

Уникальный сортament предприятия (к 80-летию завода “Днепроспецсталь”)

Дан краткий обзор истории становления и развития завода “Днепроспецсталь” за 80 лет. Представлены основные этапы освоения новых технологий и видов продукции в советский период. Показан ход масштабной реконструкции завода в последнее десятилетие. Обозначены приоритеты социального развития завода.

***Ключевые слова:** спецстали, электрометаллургия, модернизация, инвестиционные проекты, социальные программы.*

10 октября 1932 г. торжественным выпуском первой плавки ознаменовалось рождение запорожского электрометаллургического завода “Днепроспецсталь”. Эта историческая электродуговая плавка была сварена в буквальном смысле на первых киловаттах электроэнергии, полученных с турбин Днепровской ГЭС. В тяжелейших условиях, при огромных затратах физического труда и вместе с тем героическим энтузиазмом десятков тысяч рабочих и инженеров рождались первенцы индустриализации советского государства.

Сегодня ПАО “Электрометаллургический завод “Днепроспецсталь” им. А. Н. Кузьмина” — современное предприятие с замкнутым металлургическим циклом производства товарной продукции: проката, поковок, холодноотянутых профилей и сортамента со специальной отделкой поверхности из конструкционных, подшипниковых, коррозионно-стойких сталей, жаропрочных сплавов, инструментальных и быстрорежущих сталей, в том числе изготовленных методом порошковой металлургии.

“Днепроспецсталь” — единственное в Украине предприятие по производству практически всего сортамента высококачественных специальных сталей. Специалисты завода разработали технологии и освоили производство около тысячи марок стали и сотни профилеразмеров проката и поковок круглого, квадратного и прямоугольного сечений, заготовок осей железнодорожного транспорта, шайб, а также поковок переменного сечения.

Сегодня в составе предприятия работают четыре сталеплавильных цеха.

1. Сталеплавильный цех № 2 оборудован двумя электродуговыми 50-т печами, агрегатом газоислородного рафинирования для производства коррозионно-стойких сталей с низким содержанием углерода, установкой ковш-печь.

2. Сталеплавильный цех № 3 оборудован тремя электродуговыми 60-т печами, установкой ковш-печь фирмы “Danieli” и вакууматором ковшового типа фирмы “Маннесманн Демаг”.

3. Сталеплавильный цех № 5 для производства стали с помощью переплавных процессов — электрошлакового (ЭШП) и вакуумно-дугового переплава (ВДП).

4. Цех порошковой металлургии для производства инструментальных и быстрорежущих сталей методом распыления и компактирования распыленных порошков, построенный по технологии шведской компании “Asea Stora”. Цех оборудован индукционной 4-т печью, колонной для распыления жидкой стали и полу-



В. Н. Корниевский, и. о. председателя Правления ПАО “Днепроспецсталь” (г. Запорожье, Украина)

чения порошка, располагает оборудованием для гидро- и газостатического прессования порошка с получением прессовок круглого сечения размером 450×1500 мм и массой 1,9 т.

Оборудование и мощности для горячей и холодной обработки металла давлением, выполнения операций термической обработки, альюстажной и финишной обработки специальных сталей сосредоточены в цехах передельного производства.

1. Прокатный цех в составе обжимно-заготовочно-го стана 1050/950 для производства из слитков сортовой продукции диам. 130 — 275 мм и заготовки для сортовых станов. Включает три сортовых стана 280, 325 и 550 для производства прутков диам. 8 — 135 мм. В цехе расположен участок финишной обработки проката с оборудованием немецкой фирмы “Loeser” для получения шлифованных круглых прутков и трубной заготовки с шероховатостью поверхности до 6,3 мкм.

2. Термический цех оснащен печами отжига сортовой продукции и подката.

3. Калибровочный цех для производства холодно-тянутой стали и стали со специальной отделкой поверхности диам. 2 — 50 мм, а также холодноотянутого шестигранника.

4. Кузнечный цех оснащен двумя радиально-ковочными машинами РКМ-1000 и РКМ-340 австрийской фирмы “GFM” для производства сорта и заготовки из малотоннажных слитков, а также из заготовок, поступающих из прокатного и кузнечно-прессового цехов. Сортament этого подразделения — кованные прутки круглого (диам. 80 — 180 мм), квадратного и прямоугольного сечений (полосы толщиной 30 — 150 мм и шириной 80 — 350 мм), заготовки осей вагонов и локомотивов железнодорожного транспорта.

5. Кузнечно-прессовый цех в составе двух гидравлических прессов мощностью 32 и 60 МН. Сортамент цеха — поковки из труднодеформируемых сталей и жаропрочных сплавов круглого (максимальный диаметр 650 мм), квадратного и прямоугольного сечений, шайбы, а также поковки переменного сечения.

6. Цех адьюстажной обработки металла для производства обточенного и полированного проката со специальной отделкой поверхности и изготовления прутков diam. 12 – 200 мм с точностью по качеству $h9$ и $h10$. В цехе установлены две линии итальянской компании “Landgraf” для бесцентрово-токарной высокоточной обточки, правки и полировки проката.

Становление предприятия

История завода “Днепроспецсталь” богата замечательными событиями. Отметим наиболее значимые этапы становления и развития предприятия.

С 1932 по 1934 г. полностью сформирован завод. В его состав входили сталеплавильный, прокатный, кузнечный и термический цеха. В 1936 г. выпущена первая плавка в сталеплавильном цехе № 2.

В 1940 г. накануне войны труженники “Днепроспецстали” выплавляли 160 тыс. т стали, произвели 110 тыс. т проката, 19 тыс. т поковок.

В начале Великой Отечественной войны основное технологическое оборудование и ряд специалистов эвакуированы в г. Новокузнецк, где был создан завод “Спецсталь”.

На 1943 – 1948 гг. пришелся период восстановления разрушенных войной цехов предприятия. Развитие в послевоенные годы отечественных отраслей промышленности: машиностроения, энергетики (в том числе атомной), авиационной и космической техники, предприятий оборонного комплекса ставило перед металлургами “Днепроспецстали” задачи по освоению новых видов продукции из высоколегированных, качественных специальных сталей, жаропрочных и прецизионных сплавов.

В 1950-е годы осваивается технология выплавки жаропрочных сплавов. Совместно с Институтом металлургии АН СССР разработана технология выплавки трансформаторной стали с переливом из ковша в ковш под вакуумом, что позволило обеспечить ее массовое производство.

В 1957 г. вошел в строй и начал выпускать продукцию калибровочных цех.

В 1958 г. совместно с ведущими специалистами и учеными Института электросварки им. Е. О. Патона выплавляли первый полупромышленный слиток электрошлакового переплава, тем самым открыв новое направление в мировой теории и практике металлургических процессов получения специальных высококачественных сталей. В том же году освоена отливка электродов для ЭШП и ВДП на установке полунепрерывной разливки стали.

В 1959 г. совместно с научными сотрудниками ЦНИИчермета впервые в истории советской металлургии освоена технология переплава стали и сплавов в вакуумно-дуговых печах.

В 1966 г. построен специализированный сталеплавильный цех № 5, в котором налажено производство слитков электрошлакового и вакуумно-дугового переплава.

В 1972 г. начал выпускать продукцию кузнечно-прессовый цех. Здесь производились поковки крупных сечений из труднодеформируемых сталей и сплавов для нужд промышленности.

Замечательным украшением архитектурного ансамбля города и подарком для жителей Запорожья стало строительство с участием труженников завода и открытие в 1977 г. Дворца культуры “Днепроспецсталь”.

С 1980 по 1982 г. выполнена реконструкция кузнечного цеха с заменой части молотов на радиально-ковочные машины РКМ-1000 и РКМ-340.

В 1987 г. в СПЦ-2 совместно с сотрудниками Днепропетровского металлургического института впервые в СССР пущен агрегат газокислородного рафинирования и начато массовое производство коррозионно-стойких сталей с содержанием углерода $\leq 0,03$ %.

Освоение новых видов продукции, новых сталей и сплавов, современных технологий и способов производства проводили в тесном сотрудничестве с научными коллективами академических и отраслевых институтов и вузов. Достижения трудового коллектива предприятия были по достоинству оценены государством и правительством. Звания Героя Социалистического Труда в разные годы были удостоены семь днепро-спецсталевцев. Завод награжден орденами Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени.

Независимость страны — новый этап для завода

В новейшей истории обретения независимости Украины после распада СССР при отсутствии госзаказов и в связи со снижением спроса на металлопродукцию со стороны предприятий потребляющих отраслей промышленности “Днепроспецсталь”, как и многие предприятия металлургии, столкнулась с серьезными экономическими проблемами. В условиях жесточайшей конкуренции завод осваивал новые рынки сбыта, разрабатывались и производились новые виды продукции, соответствующие жестким техническим требованиям. В кратчайшие сроки осваивались новые технологии производства, европейские и американские стандарты на металлопродукцию, принципиально новые методики и шкалы оценки показателей качества. В условиях дефицита оборотных средств руководство предприятия принимает решение о строительстве в СПЦ-3 новых внепечных агрегатов. В 1997 г. пущена установка ковшепечь “Danieli”, а в 1998 г. введен в строй вакууматор “Маннесманн Демаг”. В самые тяжелые кризисные годы предприятие не останавливалось ни на один день.

В 2006 г. реализован инвестиционный проект по строительству участка переработки лома в копровом цехе с установкой пресс-ножниц фирмы “Acros”. Эта установка позволила улучшить технико-экономические показатели выплавки, снизить расход электроэнергии и электродов, сократить длительность цикла плавки.

Для повышения эффективности производства, более глубокой переработки шлаков и отходов производ-

ства, снижения нагрузки на экологию города с 2007 г. реализован проект с установкой на шлаковых отвалах комплексной линии переработки шлаков американской компании "Amcom".

В 2002 г. построен цех адьюстажной обработки металла, а с 2009 г. в прокатном цехе проводится шлифовка проката и поковок на линии финишной обработки металла фирмы "Loeser". Все это позволило расширить рынки сбыта, удовлетворить возрастающие требования к точности изготовления проката и качеству поверхности.

Большое внимание на предприятии уделяется товарному виду металлопродукции, ее эстетике. Применяются новые, современные упаковочные материалы. Построен центральный склад готовой продукции. Хранение и складирование готовой продукции вынесены за пределы завода, где осуществляется погрузка в автомобильный и железнодорожный транспорт.

В 2011 – 2012 гг. в соответствии с утвержденными проектом и бюджетом финансирования на заводе "Днепроспецсталь" построен и введен в эксплуатацию единственный в Украине цех по производству ферромолибдена из молибденового концентрата. Содержание молибдена в ферромолибдене, полученном силикоалюминотермическим способом, на первых опытных плавках превышает 60 %. Проектная мощность цеха — 300 т ферромолибдена в месяц.

Для ограничения промышленных выбросов предприятия и улучшения экологической обстановки в городе в юбилейном для завода 2012 г. в СПЦ-3 введен в эксплуатацию новый комплекс газоочистных сооружений с рукавными фильтрами. Пылегазоочистка производительностью 1,2 млн м³/ч осуществляет отбор и фильтрацию выбросов от загрязняющих технологических источников. Инвестиции в проект по строительству газоочистки в СПЦ-3 составили более 10 млн долл. США.

В качестве основных целей и задач развития предприятия и модернизации его основных средств заводскими специалистами и службами маркетинга определены на ближайшую перспективу следующие стратегические проекты:

модернизация заготовочно-обжимного стана 1050/950 с увеличением мощности главного привода до 7,1 МВт;

масштабная реконструкция радиально-ковочных машин РКМ-1000 и РКМ-340;

приобретение универсальной линии термообработки проката и поковок;

приобретение высокопроизводительной автоматизированной линии для правки и обточки проката, оборудованной фаскосъемным устройством.

Все виды металлопродукции, а также система менеджмента качества ISO 9001:2008 сертифицированы и подтверждаются международно признанными организациями.

Социальная поддержка коллектива

"Днепроспецсталь" — социально ориентированное предприятие, которое предоставляет своим сотрудни-

кам все социальные гарантии, предусмотренные действующим законодательством Украины. Наряду с этим внедряются дополнительные социальные программы. 1 октября 2010 г. "Днепроспецсталь" стала участником Глобального договора ООН. Присоединением к Глобальному договору предприятие подтвердило свое намерение сделать этот договор и его принципы частью стратегии компании и принимать участие в проектах, направленных на продвижение целей развития ООН, особенно Целей Тысячелетия.

Ежегодно завод выделяет более 40 млн грн. на социальные мероприятия. Выплачивается дотация на организацию перевозок трудящихся на работу и с работы. Компания предоставляет работникам предприятия и их семьям возможность всесезонного оздоровления по льготным путевкам в санатории-профилактории "Днепроспецсталь" на острове Хортица, а в летний период — на базе "Металлург", расположенной на берегу Азовского моря. Ежегодно по льготным путевкам в детских оздоровительных центрах на Азовском и Крымском побережьях отдыхают более 400 детей заводчан.

Каждый год проводится спартакиада "Днепроспецстали" по массовым видам спорта. Лучшие спортсмены по итогам состязаний награждаются денежными премиями и участвуют в областных и всеукраинских спортивных соревнованиях. Персонал предприятия обеспечен медицинским обслуживанием с возможностью лечения работников за счет страховых компаний. Сотрудникам завода предоставляется возможность бесплатного прохождения профилактических медицинских осмотров и вакцинации.

Предприятие регулярно организует корпоративные мероприятия в самом крупном Дворце культуры города — ДК "Днепроспецсталь", который по праву считается лучшим дворцом культуры Запорожья. Ежегодно здесь проходят традиционные общезаводские праздники — концерты к 8 Марта, Дню металлурга, Дню рождения завода, Новому году. Кроме того, здесь проходят День первоклассника и День многодетной семьи. Кстати, всем одиноким матерям и многодетным семьям ежегодно выплачивается материальная помощь к 1 сентября и ко Дню многодетных семей, которых на "Днепроспецстали" насчитывается более 250. В любимом для заводчан оздоровительном центре "Чайка", что на Великом Лугу, днепроспецсталевцы проводят традиционные мероприятия — День молодой семьи и Семейно-спортивный праздник. В течение года на "Днепроспецстали" регулярно проходят Дни донора с привлечением областной станции переливания крови. Заводчане сдают более 400 л крови в год. Наши социальные программы предусматривают не только поддержку работников предприятия, но и заботу о ветеранах — полноправных членах коллектива ПАО "Днепроспецсталь"

Залогом успеха во многом был и остается коллектив "Днепроспецстали" с его многолетними традициями и опытом производства наукоемкой металлопродукции из высококачественных легированных сталей.



Строительная площадка будущих цехов



Начало строительства термического цеха, 1931 г.



Первый ряд подкрановых балок термического цеха
16 ноября 1931 г.



Общий вид электролизного цеха 23 мая 1932 г.



Первая печь готова к плавке



Строительство ЗИСа



Исследования и новые разработки в технологии производства качественных специальных сталей

Изложены результаты исследований и разработок последних лет по улучшению качества и снижению себестоимости продукции сортаментных групп коррозионностойких и подшипниковых сталей. Разработаны технологии производства инструментальных и коррозионностойких сталей с особыми дополнительными требованиями по поперечному удару. Выполнены работы по сокращению прибыльной части слитка и расхода металла на прокат.

Ключевые слова: коррозионностойкие стали, подшипниковая сталь, открытая дуговая печь, агрегат газокислородного рафинирования, установка ковш-печь, альфа-фаза, предел текучести, горячее кручение, легирование, ферросиликомарганец.

Современный рынок специальных сталей и конкурентная борьба диктуют производителям необходимость активно проводить модернизацию, реализовывать организационные и технические мероприятия, направленные на повышение эффективности производства, внедрение оптимальных технологических схем, снижение уровня затрат на единицу выпускаемой продукции. При этом преобладающими остаются вопросы улучшения качества выпускаемой продукции, удовлетворения все более возрастающих требований нормативных документов и запросов потребителей.

В 2003 г. на заводе “Днепрспецсталь” в сталеплавильном цехе № 2 была введена в эксплуатацию установка ковш-печь, и в настоящее время практически весь сортамент выплавляется с применением этого агрегата. Низкоуглеродистые ($C < 0,03 \%$) коррозионно-стойкие стали (КСС) в объеме 100 % выплавляются по схеме: открытая дуговая печь (ОДП) – агрегат газокислородного рафинирования (ГКР) – установка ковш-печь (УКП). Конструкционные, в том числе легированные, инструментальные, рессорно-пружинные стали, а также КСС с $C \geq 0,08 \%$, задаваемые на выплавку из СПЦ-2, в полном объеме проходят обработку на установке ковш-печь.

При выплавке по данной схеме были реализованы все известные преимущества [1]:

сокращены длительность плавки, расход электроэнергии и электродов за счет переноса операций рафинирования и корректировки химического состава;

обеспечены возможности работы в более узком интервале значений химических элементов, в том числе на пониженных допускаемых уровнях дорогостоящих легирующих материалов;

полностью исключен брак по химическому составу.

Основной и наиболее экономичной технологической схемой производства коррозионностойких сталей на заводе “Днепрспецсталь” является выплавка с применением агрегата газокислородного рафинирования. Технологический процесс включает выплавку полупродукта в электродуговой печи, обработку металла в агрегате ГКР, обработку металла на установке ковш-печь. Из наиболее значимых мероприятий по сокращению удельных затрат при производстве КСС отметим:

1. Замену хромитопериклазовой футеровки конвертера ГКР на доломитовые огнеупоры производства Германии. Стойкость конвертера возросла более чем в 3 раза — с 32 плавов в 2001 г. до 110 плавов в 2012 г.



А. И. Панченко

Заместитель председателя Правления — технический директор ПАО “Днепрспецсталь” (г. Запорожье, Украина)

При этом в 1,7 раза сокращены удельные затраты по стоимости огнеупоров на 1 т выплавляемой стали. Вместе с тем для обеспечения высокой стойкости доломитовой футеровки конвертера вынуждены были перейти на шлаковый режим плавки, предусматривающий более высокий расход извести, плавикового шпата, ферросилиция ФС-65, необходимого для восстановления хрома [2].

2. Совершенствование дутьевого и шлакового режимов в агрегате ГКР, оптимизация технологии раскисления и модифицирования коррозионностойких сталей, выплавленных по технологии ОДП + ГКР + УКП.

В рамках этих работ разработана математическая модель окисления элементов высокохромистого расплава и на ее основе внедрена программа расчета 1-го периода ГКР с использованием ПЭВМ. Кроме того, внедрение технологии выплавки с УКП позволило существенно сократить длительность 3-го периода обработки расплава на ГКР. Благодаря использованию математической модели и методик определения окисленности расплава металл сливается из конвертера без проверки химического состава, а операции по рафинированию и доводке стали по химическому составу перенесли из ГКР на УКП.

Реализация этих мер позволила существенно сократить расход раскислителей и шлакообразующих материалов: ферросилиция, извести, плавикового шпата, снизить расход аргона. В результате получена значи-

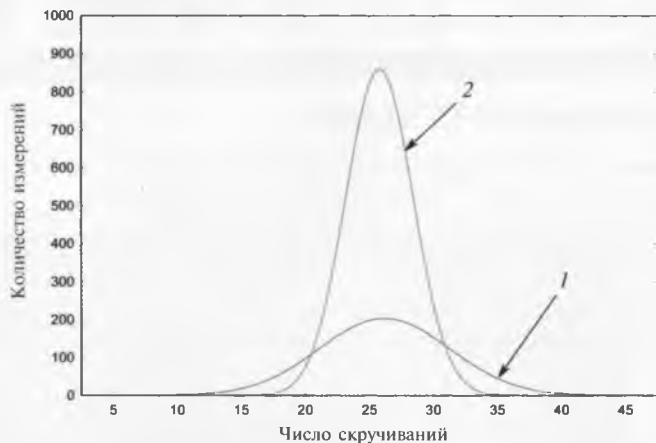


Рис. 1. Гистограмма распределения результатов испытаний на горячее кручение в стали 08–12X18H10T до (1) и после (2) введения суженных границ химического состава

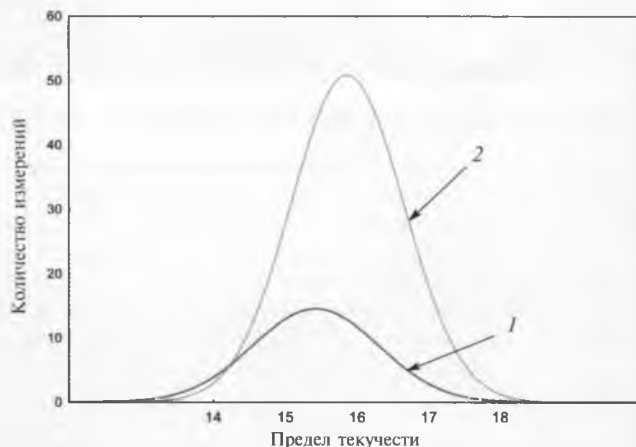


Рис. 2. Распределение результатов испытаний предела текучести при 350 °С на стали 08–12X18H10T до (1) и после (2) введения суженных границ химического состава

тельная экономия средств предприятия. Внедрение агрегата ковш-печь обеспечило экономичный режим выплавки КСС по расходу легирующих элементов, прежде всего по никелю и хрому, а также заданные суженные пределы содержания элементов (Ni, Cr, Mo, Mn, Si, C) и требования нормативных документов по механическим свойствам, показателям испытаний на горячее кручение и содержанию альфа-фазы.

С целью определения возможности работы на нижних граничных значениях по содержанию никеля с привлечением методов математического анализа и статистики были обработаны массивы из более чем двухсот плавок. Установлены корреляционные связи между параметрами, получены уравнения множественной регрессии, которые позволяют с достаточной вероятностью прогнозировать показатели механических свойств. Исследовано влияние химического состава на расчетное содержание альфа-фазы и проведены механические испытания, в том числе при высоких температурах.

На основании выполненного анализа разработаны суженные пределы содержания легирующих элементов, при которых гарантированно обеспечиваются требования по содержанию альфа-фазы, показателям механических свойств, в том числе при высоких температурах (прежде всего предел текучести при 350 °С), необходимое число скручиваний при испытаниях на горячее кручение при производстве трубной заготовки из коррозионностойких сталей по ТУ 14-1-790, ТУ 14-1-565 и другим нормативным документам.

Статистическая обработка массива данных по коррозионностойким сталям 08–12X18H10T, выплавленным после задания оптимального соотношения элементов химического состава, показывает, что проблемные показатели качества, такие как число “горячих” кручений и предел текучести при 350 °С, удовлетворяют требованиям технических условий (рис. 1, 2). Кроме того, принятые технологические решения позволили существенно снизить себестоимость коррозионностойких сталей.

Анализом показателей качества, первичной отбра-

ковки по дефектам, выявленным при ультразвуковом контроле и контроле поверхности титаносодержащих коррозионностойких сталей, была установлена зависимость увеличения отбраковки от содержания азота в стали. В результате выполненных работ установили основные факторы (рис. 3) и внесли коррективы в технологию внепечной обработки с целью снижения содержания азота в стали и улучшения качества. Оптимизация технологии выплавки по схемам ОДВ – УПК, ОДВ – ГКР – УПК позволила значительно (до 30 %) снизить содержание азота в стали, существенно сократить первичную отбраковку коррозионностойких сталей, стабилизированных титаном, по дефектам сталеплавильного производства, так называемой титанистой неоднородности, отбраковку при ультразвуковом контроле, улучшить качество поверхности проката (рис. 4).

При выполнении экспортных заказов на производство низкоуглеродистых КСС типа 03X18H10 и 02X19H9 столкнулись с проблемой технологической пластичности при прокатке слитков на стане 1050/950. В ряде случаев металл в промежуточном профиле (полоса 360×420 мм) из-за образования рванин “выбрасывали” на зачистку. Причиной неудовлетворительной пластичности было повышенное (расчетное и измеренное) содержание ферритной фазы, которое в заказах на производство этих сталей не регламентируется. С целью снижения содержания альфа-фазы и улучшения технологической пластичности выполнили работы по легированию этих сталей (не стабилизированных титаном) азотом, среднее содержание которого было увеличено примерно в 2 – 3 раза (до 0,070 – 0,10 %). Прокатаны тысячи тонн металла с удовлетворительной технологической пластичностью.

Следующее направление работ, которое в настоящее время реализовано и направлено на сокращение затрат и улучшение качества коррозионностойких сталей, — повышение стойкости и надежности эксплуатации ковшовых огнеупоров в сталеплавильном цехе № 2. В 2006 г. после ввода в эксплуатацию участка наливных футеровок ковшей и автоматизированных сушиек “МАРЕКО” в СПЦ-2 начато освоение техно-

логии изготовления и эксплуатации наливных футеровок в сталеразливочных ковшах КС-70. Монолитная наливная футеровка арматурного и рабочего слоев изготовлена из саморасплавляющихся и тиксотропных бетонов, кладка шлакового пояса выполнена из периклазоуглеродистого кирпича. Все работы выполняются при технологическом сопровождении фирмы “Кальдерис-Украина”. По результатам эксплуатации ковшей получено повышение стойкости футеровки в 3,6 раза. Удельные затраты снижены в 1,8 раза.

Следует отметить, что завод “Днепроспецсталь” одним из первых в новейшей истории Украины с 1998 г. начал осваивать технологию наливных высокопрочных бетонов для ковшей КС-90 в сталеплавильном цехе № 3 после внедрения внепечных процессов в ковше-печи “Даниэли” и вакууматоре “Маннесманн Демаг”. В результате этой работы стойкость ковшей увеличена в пять раз, удельный расход огнеупоров снижен более чем в четыре раза, удельные затраты на 1 т выпускаемой стали снижены более чем вдвое.

К важным достижениям заводских специалистов в последние годы относится успешное выполнение заказов на производство поковок трубной заготовки из сталей 06–08X18N10T-ВД по ТУ 14-1-2787, используемой для изготовления ответственных изделий контуров охлаждения атомных электростанций. Механические свойства этого металла контролируются при комнатной и повышенной температурах (350 и 450 °С).

Наиболее проблемным на протяжении всех лет работы по указанным ТУ (с 1979 г.) было обеспечение предела текучести при 350 °С. Поэтому приходилось идти на сложные схемы деформационного передела. Слитки ВДП ковали на прессах кузнечно-прессового цеха на заготовку, которую в дальнейшем передавали на радиально-ковочные машины в кузнечный цех. Согласовывали схемы вырезки образцов на испытание, закалку образцов заготовок проводили в различных средах охлаждения — в воде и на воздухе. Однако в целом ряде случаев металл не соответствовал требованиям технических условий по показателю предела текучести при 350 °С, и его переводили на другие заказы с менее жесткими требованиями.

На основании результатов анализа химического состава плавок, выплавленных в течение последних лет, было установлено, что наряду с содержанием углерода, никеля и хрома несколько большие значения предела текучести при высоких температурах наблюдаются на плавках с более высоким содержанием молибдена и ванадия. Согласно литературным данным [3, 4] молибден, упрочняя решетку при легировании стали, повышает предел текучести, а ванадий способствует уменьшению зерна и соответственно повышению механических свойств. Сотни тонн стали сложнейшего сортамента, легированной молибденом и ванадием в рамках допускаемых ТУ 14-1-2787 значений ($Mn \leq 0,30 \%$; $V \leq 0,20 \%$), были отгружены потребителю в последние годы.

Для изготовления крупных поковок из стали 08X18N10T-Ш, поставляемых на экспорт, специали-

тами завода разработана технология выплавки методом ЭШП титансодержащих коррозионностойких сталей, разливаемых в кристаллизатор диам. 800 мм. Наряду с решением задач по отработке технологии изготовления электродов, электрических режимов ЭШП по ходу плавки для получения высокого качества поверхности слитков ЭШП требовалось ограничить в жестких пределах содержание неметаллических включений.

В соответствии с требованиями заказа неметаллические включения должны контролироваться по ASTM методом D, что предусматривает использование автоматизированных методов контроля всех типов включений, различаемых по морфологическим признакам (в том числе в поляризованном свете) не менее чем в 320 полях зрения на каждом образце. Анализ проводили по специально разработанной программе на микроскопе “Axiovert 200 Mat” компании “Карл Цейсс” с автоматическим перемещением приборного столика и анализатором изображений, совмещенных с компьютером.

Программное обеспечение и методика оценки неметаллических включений разработаны работниками ЦЗЛ и цеха испытаний “Днепроспецстали” в тесном сотрудничестве со специалистами “УкрНИИ Спецсталь”, компаний “Карл Цейсс” и “ВидеоТест” (г. Санкт-Петербург). Решение этих задач стало возможным благодаря реализации инвестиционных проектов по оснащению ЦЗЛ, цеха испытаний и аналитической лаборатории ДСС современным металлографическим, испытательным и аналитическим оборудованием. Всего зарубежным потребителям было отгружено более тысячи тонн сталей ответственного сортамента 08X18N10T-Ш и 08X22N6T-Ш.

Завод “Днепроспецсталь” является одним из крупнейших поставщиков на рынки СНГ и Западной Европы металлопроката из подшипниковых сталей ШХ15, ШХ15СГ, ШХ4, ШХ20СГ, выплавляемых в сталеплавильном цехе № 3 с вакуумированием, а также дуплекс-процессом с применением метода электрошлакового переплава для изготовления высокоответственных изделий из этих сталей.

Улучшение качества подшипниковой электростали достигается постоянным совершенствованием технологии выплавки и внепечной обработки стали на основе результатов проводимых комплексных научно-исследовательских работ [5]. Сталеплавильный цех № 3 оборудован тремя электродуговыми печами ДСП-60, а также установками внепечного рафинирования стали (ковш-печь фирмы “Даниэли”, ковшовый вакууматор фирмы “Маннесманн Демаг”). Подшипниковая сталь разливается сифонным способом в изложницы для слитков массой 3,6 т. Прокатка слитков на сортовые прутки и заготовку для сортовых станов выполняется на заготовочно-обжимном стане 1050/950 в прокатном цехе. Подшипниковая сталь поставляется в отожженном состоянии или без термической обработки.

При поставке в страны СНГ основные технические требования к стали регламентированы ГОСТ 801 – 78. При поставке в дальнее зарубежье показатели макро-

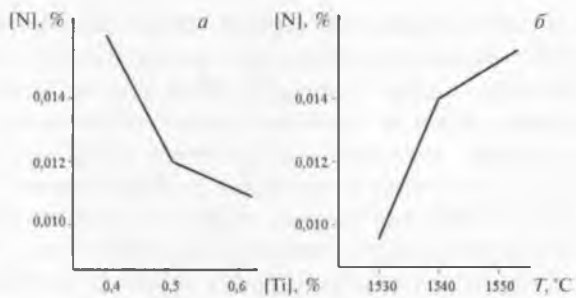


Рис. 3. Зависимость концентрации азота от содержания титана в металле (а) и температуры расплава (б)

и микроструктуры (в том числе карбидная неоднородность, зернистый перлит) устанавливаются соответствующими стандартами Европы и Северной Америки, контроль загрязненности стали неметаллическими включениями осуществляется в основном по ASTM E (метод А) или DIN 50602.

Одним из наиболее проблемных показателей на протяжении многих лет было обеспечение требований по содержанию неметаллических включений подшипниковой стали ШХ15СГ, особенно при контроле по ГОСТ 801 – 87, I группа (прокат диам. ≤ 40 мм, сталь отожженная). В 2007 г. количество образцов с недопустимыми глобулярными, оксидными или сульфидными включениями при контроле в цехе испытаний (из каждой партии контролируется не менее шести образцов) составляло 14,8 %. В целях улучшения качества подшипниковой стали выполнены следующие работы:

полностью отказались от разливки стали в слиток массой 4,5 т, отдав предпочтение слитку 3,6 т, который наряду с лучшими показателями макроструктуры (прежде всего по подусадочной ливкации) показал более высокие результаты по чистоте от неметаллических включений и карбидной неоднородности;

всю разливку подшипниковой стали перевели на использование сифонных изделий из высокоглиноземистых огнеупоров (содержание $\text{Al}_2\text{O}_3 > 75\%$) взамен шамотных изделий;

выполнен комплекс работ по совершенствованию технологии выплавки в электродуговой печи, порядку ввода раскислителей, ТШМ и ферросплавов, уточнены элементы внепечной обработки стали в ковшепечи и вакууматоре;

проведены работы по использованию для легирования и раскисления стали ферросилиция со сверхнизким содержанием кальция производства Японии, что позволяет снизить содержание глобулярных и оксидных включений.

Значительного прогресса в улучшении качества подшипниковой стали, снижении уровня загрязненности неметаллическими включениями (глобулярными и оксидными) удалось достичь за счет внедрения технологии выплавки и отработки элементов внепечной обработки с использованием комплексных ферросплавов (легирующих и одновременно раскислителей) — ферросиликомарганца МнС 25 и МнС 17. Эти работы проводились в последние годы в тесном сотрудничестве с коллективом кафедры электрометал-

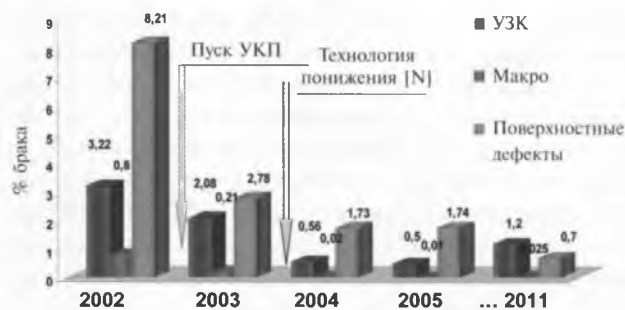


Рис. 4. Динамика отбраковки титанистых коррозионностойких сталей в прокатном цехе по дефектам сталеплавильного производства

лургии стали и ферросплавов Национальной металлургической академии Украины (НМетАУ) под руководством академика НАН Украины М. И. Гасика.

Результаты исследования химико-металлургических процессов формирования легкоплавких продуктов раскисления, состоящих из сложных комплексных соединений (оксидов), показали (рис. 5), что доля образцов с выпадками по всем видам неметаллических включений сократилась практически в 15 раз и в последние годы составляет $\sim 1\%$.

В условиях кризиса (IV квартал 2008 г. – 2009 г.) при снижении спроса на металлопродукцию, сокращении заказной части и объемов производства руководством предприятия была подготовлена и реализована антикризисная программа. К ее приоритетным положениям относились решения по сокращению затрат на производство, снижению себестоимости продукции и повышению ее конкурентоспособности. В тот период была выполнена масштабная по объему исследований и испытательная работа по уменьшению прибыльной части слитков, снижению расхода шихты на выплавку и расхода металла на прокат. Специалистами ЦЗЛ и проектно-конструкторского отдела разработаны новые конструкции изложниц без надставок для слитков массой 4,5 и 6,5 т. Для утепления прибыльной части слитков внедрены тепловставки фирмы “Фосеко”.

Одновременно проведены работы по уточнению технологии конечного раскисления стали различных сортаментных групп, поиску более эффективных разливочных и утепляющих смесей. Для удобства в работе и обслуживании во дворах изложниц сталеплавильных цехов построены соответствующие площадки. Существенно улучшены условия и безопасность труда во дворах изложниц и на разливочных участках. Результатом этой работы стало сокращение головной обрезки на слитках всей номенклатуры (3,6; 4,5 и 6,5 т) на 1,5 %.

В период новейшей истории независимости Украины разработаны технологии производства, освоены сотни марок сталей и профилеразмеров по всем сортаментным группам сталей и сплавов:

- жаропрочные и жаростойкие;
- коррозионностойкие стали различных классов;
- инструментальные и быстрорежущие стали, в том числе производимые методом порошковой металлургии;
- конструкционные углеродистые и легированные стали, поставляемые без отжига, с отжигом, в норма-



Рис. 5. Динамика выпадов по видам неметаллических включений в стали ШХ15СГ с оценкой по ГОСТ 801–78

лизованном состоянии, а также с термоулучшением (после закалки и отпуска проката и поковок);

подшипниковые стали и др.

Освоено производство кованых заготовок для осей вагонов железнодорожного транспорта, локомотивов, а также заготовок для скоростных вагонов европейских железных дорог.

В соответствии с требованиями зарубежных стандартов выполнены исследования и разработаны технологии производства инструментальных сталей

4Х5МФ(1)С, выдерживающих работу удара на поперечных образцах ≥ 200 Дж. Для коррозионностойких сталей (в том числе титаносодержащих) ответственного назначения отработана технология, обеспечивающая стойкость к поперечному удару ≥ 60 Дж.

В год 80-летнего юбилея завод “Днепроспецсталь” сохраняет лидирующие позиции на рынке специальных сталей и сплавов, его коллектив уверенно смотрит в будущее, строит открытые отношения с партнерами, а залогом успеха является высокое качество выпускаемой продукции.

Библиографический список

1. Сальников А. С. Совершенствование технологии и повышение эффективности выплавки коррозионностойких сталей // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2007. № 2. С. 22 – 24.
2. Шульга В. О., Король Л. Н., Сальников А. С. и др. Опыт освоения производства легированной высококачественной стали с обработкой на установке ковш-печь // *Сталь*. 2004. № 2. С. 22 – 23.
3. *Металловедение и термическая обработка стали*: справ. изд. – 4-е изд., перераб. и доп. В 3 т. / под ред. М. Л. Бернштейна, А. Г. Рахштафта. — М.: Металлургия, 1991. — 1131 с.
4. Гольдштейн М. Н., Грачев С. В., Векслер Ю. Г. Специальные стали. — М.: Металлургия, 1985. — 408 с.
5. Панченко А. И., Логозинский И. Н., Сальников А. С. Разработка и промышленное освоение инновационной технологии выплавки и внепечной обработки подшипниковой электростали ШХ15СГ-В с использованием ферросиликомарганца MnC 17 // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2008. № 5. С. 69 – 73.

УДК 669.187.26

Освоение инновационной технологии выплавки электростали ШХ15СГ-В с регламентированным содержанием неметаллических включений

Обобщены и проанализированы сводные данные о технологии выплавки электростали ШХ15СГ-В в дуговых печах ДСП-60, внепечной обработке в ковше-печи и ковшевом вакууматоре; приведены результаты сдаточного и исследовательского контроля сортового проката по неметаллическим включениям по балльной оценке по ГОСТ 801 – 78 и ASTM E-45 (метод А).

Ключевые слова: подшипниковая сталь ШХ15СГ-В, технология электроплавки, раскислители, легирующие, твердые шлаковые смеси, ковш-печь, вакууматор, слитки, сортовой прокат, неметаллические включения.

Запорожский электрометаллургический завод “Днепроспецсталь” является одним из крупнейших в странах СНГ и Европе металлургических предприятий по производству электростали массового и специального назначения. В структуре металлопродукции предприятия значительный сегмент по объемам производства и в стоимостном выражении занимают стали подшипникового сортамента ШХ15 – ШХ15СГ. Качество подшипникового металла обеспечивается совершенствованием технологии выплавки и внепечной обработки стали на основе результатов проводимых системных научно-исследовательских работ.

Электросталеплавильный цех № 3, специализированный на выплавке подшипниковой стали, оборудован четырьмя дуговыми печами ДСП-60, а также комплектом внепечного рафинирования стали в составе ковш-печь, ковшевой вакууматор. Подшипниковая сталь разливается сифонным способом в слитки массой 3,6 т [1]. Прокатное оборудование завода обеспечивает прокатку слитков с получением заготовок и сортового проката пяти размерных групп ГОСТ 801 – 78, что позволяет выполнять заказы потребителей металлопродукции с учетом всех требований по различным параметрам сортового проката.

А. И. Панченко¹,
канд. техн. наук А. С. Сальников¹,
Л. М. Скрипка¹,
докт. техн. наук М. И. Гасик²,
канд. техн. наук А. П. Горобец²
¹ ПАО “Днепроспецсталь”
(г. Запорожье, Украина),
² НМетАУ (г. Днепропетровск, Украина)

Таблица 1. Химический состав ферросиликомарганца MnC17 ДСТУ 3548 – 97

| № партии | Массовая доля элементов, % | | | | | | | |
|--------------------|----------------------------|------|--------------|----------------------|--------|---------------------|-------|-------|
| | C | Mn | Si | P | S | Ti | Al | Ca |
| 826 | 1,61 | 74,9 | 17,9 | 0,12 | 0,020 | 0,35 | 0,016 | 0,025 |
| 23986 | 1,82 | 73,1 | 16,6 | 0,25 | 0,015 | 0,22 | 0,020 | |
| Нормы ДСТУ 3548–97 | | | | | | | | |
| | ≤ 2,5 | ≥ 65 | 15,0 20,0 | ≤ 0,10(А) 0,60(Б) | ≤ 0,03 | Не регламентируется | | |

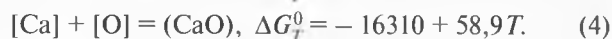
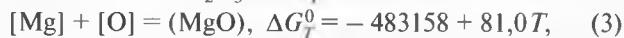
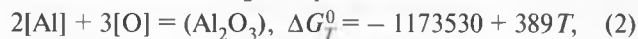
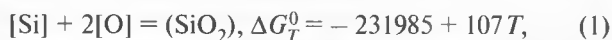
При внепечной обработке в результате рафинирования металла достигнуто содержание кислорода в пределах 10 – 15 ppm, серы 12 – 20 ppm, что, однако, не обеспечивает стабильных показателей качества подшипникового металла по содержанию и составу неметаллических включений. Особенно это положение отражается в сквозной технологии производства стали ШХ15СГ, характеризующейся сквозной прокаливаемостью и поставляемой заказчиком в крупных профилируемых размерах для изготовления крупногабаритных тел качения.

Следует отметить, что потребность отечественных подшипниковых заводов в сортовом прокате в последние годы существенно повысилась в связи с поставками значительных партий подшипников в страны ближнего и дальнего зарубежья. Увеличились поставки трубной заготовки трубопрокатным заводам для производства труб подшипникового сортамента, используемых при изготовлении колец подшипников для подвижного магистрального железнодорожного транспорта.

Харьковский подшипниковый завод (ПАО “ХарП”) является одним из основных поставщиков подшипников в страны СНГ, Балтии, Западной Европы и Южной Америки. В связи с этим в ПАО “ХарП” проведена реконструкция оборудования для изготовления подшипников повышенного класса точности, удовлетворяющих жестким требованиям машиностроителей. ПАО “ХарП” реализует также инвестиционный проект, предусматривающий создание производства подшипников для тяговых двигателей. Это позволит заводу занять лидирующие позиции в сегменте рынка подшипников для железнодорожного транспорта, что имеет важное значение для Украины и России в связи с развитием транспортных коридоров на территории наших стран.

Наряду с повышением требований к размерным параметрам элементов подшипников ужесточаются требования к качеству заготовок сортового проката по неметаллическим включениям по ГОСТ 801 – 78 (с рядом изменений) и ASTM E-45 (метод А). Целевая задача получения сортопроката со стабильно низкими баллами (ГОСТ 801 – 78) по всем типам неметаллических включений (особенно труднодеформируемым глобулярным) реализуется технологией раскисления стали и контролем содержания в металле высокоактивных элементов – Ca, Mg, Al. Исходя из анализа глобулярных включений методами оптической микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа, состав многокомпонентного включения может быть представлен как результат реакций минералооб-

разования в системе CaO – MgO – Al₂O₃ – SiO₂. Термодинамические условия формирования первичных (по В. И. Явойскому) включений с участием элементов раскислителей в общем случае описываются реакциями (Дж/моль):



Вместе с тем реакции (1) – (4) носят частный характер, поскольку не отражают взаимодействия образующихся оксидных фаз. Указанное взаимодействие качественно может быть отражено через образование минералов (*M*), представляющих ассоциацию минеральных фаз, в которых ведущий оксид *i* определяет направление протекания кристаллохимических реакций:



Как результат, при продолжительной кристаллизации стали в двухфазной области ликвидус – солидус создаются предпосылки для протекания твердофазных процессов минералообразования с выделением из первичной многокомпонентной оксидной фазы оксида, определяющего впоследствии тип включений:



Состав стали подшипникового сортамента (~ 1 % C, 1,5 % Cr, 0,4 – 1 % Mn) предопределяет увеличенный (> 100°) интервал температур области ликвидус – солидус. Поэтому ограничение развеса слитка, и тем самым сокращение длительности затвердевания стали, широко используется в практике производства подшипниковой стали как один из методов управления процессами формирования включений.

По действовавшей технологии сталь ШХ15СГ выплавляли с использованием в качестве легирующих высокоуглеродистого ферромарганца ФМн78 (ДСТУ 3547 – 97) и ферросилиция ФС65 (ДСТУ 4127 – 2002). Металл – полупродукт из дуговой печи ДСП-60 рафинировали в ковш-печи от серы твердыми шлаковыми смесями состава CaO (известь) – CaF₂ (плавиковый шпат) легировали марганцем (ферромарганцем) и раскисляли кремнием (ферросилиция) и алюминием. На завершающей стадии сталь подвергали вакуумной обработке в ковшевом вакууматоре с конечным раскислением алюминием.

Таблица 2. Технологические параметры выплавки опытных плавов ШХ15СГ-В с применением ферросиликомарганца марки МнС17*

| Присадка МнС17, кг на плавку | Корректирующие добавки, кг на плавку | | | | ФМн78 УКП | Масса плавки, т |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------------|
| | ФС65 | | | | | |
| | печь | ковш | УКП | Σ | | |
| Вариант 1 (присадка МнС17 в ковш) — 12 плавов | | | | | | |
| 750 — 850/803 | 140 — 200/149 | 100 — 270/173 | 50 — 340/132 | 300 — 620/453 | 0 — 90/16 | 56,00 — 63,33/60,47 |
| Вариант 2 (присадка МнС17 в печь) — 24 плавки | | | | | | |
| 800 — 960/847 | 100 — 200/153 | 130 — 240/161 | 0 — 350/136 | 350 — 630/450 | 0 — 100/47 | 59,07 — 63,66/61,30 |
| Обобщенные показатели по вариантам 1 и 2 | | | | | | |
| 550 — 960/825 | 100 — 200/151 | 100 — 270/167 | 0 — 350/134 | 300 — 630/452 | 0 — 100/32 | 56,00 — 63,66/60,88 |

* Числитель — минимальные и максимальные значения, знаменатель — средневзвешенные значения.

Несмотря на тщательно контролируруемую технологию производства стали, выход годного сортового проката с первого слаточного контроля качества металла не превышал 70 — 75 %. Физико-химический аудит сквозной технологии позволил установить [2, 3], что одной из основных причин повышенного количества выпадов образцов с высокими баллами по загрязненности сортового проката неметаллическими включениями, и прежде всего глобулярными труднодеформируемыми алюминатами кальция, является использование ферросилиция марки ФС65 с нерегулируемым стандартом ДСТУ 4127 — 2002 высоким содержанием кальция (до 0,6 %) и особенностями формирования продуктов реакции раскисления стали при раздельном вводе марганца (ферромарганца) и кремния (ферросилиция). Результаты физико-химического аудита сквозной технологии получения стали ШХ15СГ-В обобщены в предыдущих публикациях [4, 5].

Для решения актуальной межотраслевой задачи повышения качества подшипниковой стали ШХ15СГ-В разработана и освоена технология выплавки этой стали, как и стали других марок группы подшипникового сортамента, с использованием ферросиликомарганца МнС17 с 17 % Si и ~ 0,02 % Са (см. табл. 1). Установлено, что при вводе ферросиликомарганца образуются продукты реакции раскисления металла в виде легкоплавких силикатов марганца, которые наиболее полно ассимилируются шлаком при обработке стали в ковше-печи шлакообразующими смесями.

В период промышленного освоения технологии выплавки стали ШХ15СГ-В в печи ДСП-60 плавки проводили по двум вариантам, различающимся в основном присадками ферросиликомарганца МнС17 в ковш (вариант 1) и сталеплавильную ванну (вариант 2). Остальные технологические операции плавов стали по вариантам 1 и 2 проводились в полном соответствии с технологической инструкцией.

Как следует из данных табл. 2, всего проведено 36 плавов стали ШХ15СГ-В, в том числе 12 по варианту 1 (с присадкой МнС17 в ковш) и 24 плавки по варианту 2 (с присадкой МнС17 в печь).

Масса жидкого металла при выплавке стали по варианту 1 изменялась от 56,00 до 63,33 т и в среднем составляла 60,47 %; по варианту 2 от 59,07 до 63,66 т — в среднем 60,88 т.

Присадка ферросиликомарганца МнС17 в плавках стали по варианту 1 составила в среднем 803 кг на плавку при расходе ферросилиция ФС65 453 кг; по варианту 2 — МнС17 847 кг и ферросилиция ФС65 450 кг.

Из данных табл. 3 следует, что удельный расход ферросиликомарганца МнС17 в случае присадки его в печь (вариант 2) составил 13,82 кг/т жидкой стали, что на 0,54 кг/т больше, чем в случае присадки в ковш (вариант 1). При этом плавки по варианту 1 сопровождались повышением расхода ферросилиция ФС65 на 0,15 кг/т, (7,49 кг/т по варианту 1 против 7,34 кг/т по варианту 2). Таким образом, выплавка стали по варианту 1 (присадка всех ферросплавов в ковш) характеризуется несколько меньшим общим расходом ферросплавов в сравнении с плавками по варианту 2, хотя это различие и не столь существенно, в том числе и с учетом оценки стоимости ферросплавов, в сравнении с технологическим преимуществом присадок ферросиликомарганца МнС17 в сталеплавильную ванну печи ДСП-60.

Эффективность применения ферросиликомарганца МнС17 подтверждается результатами контроля качества сортового проката стали ШХ15СГ-В по неметаллическим включениям. Всего проконтролировано 165 образцов сортового проката стали от 20 партий из 12 плавов по варианту 1 и 374 образца от 52 партий из 24 плавов по варианту 2 (табл. 4). Обращают внимание данные о более высоком выходе годных партий с первого контроля сортового проката плавов стали по варианту 2 (98 %), чем по варианту 1 (90 %).

Следует отметить, что меньший выход годного по варианту 1 связан в основном с повышенным выпадом образцов III группы по оксидам (13,8 %) при 100 %-ных выходах годного по I, II, IV и V группам ГОСТ 801 — 78. Для определения качественных характеристик ме-

Таблица 3. Сравнительные расходные показатели применения ферросплавов при выплавке стали ШХ15СГ по опытной и действующей технологии

| Ферросплав | Удельный расход ферросплавов, кг/т | | | |
|---------------------------|------------------------------------|-----------|-------|-----------------|
| | МнС17 | | | ФС65 и ФМн78 |
| | 1 вариант | 2 вариант | Σ | |
| Ферросиликомарганец МнС17 | 13,28 | 13,82 | 13,55 | — |
| Ферросилиций ФС65 | 7,49 | 7,34 | 7,42 | 12,4 |
| Ферромарганец ФМн78 | 0,26 | 0,77 | 0,53 | 12,9 |
| Итого | 21,03 | 21,93 | 21,5 | 25,3 |

Таблица 4. Обобщенные результаты по загрязненности неметаллическими включениями сортопроката опытных плавков стали ШХ15СГ при первичной оценке по ГОСТ 801 – 78 (слаточный контроль) в зависимости от варианта технологии

| Группа по ГОСТ 801 – 78* | Количество, шт. | | Вид неметаллических включений | | | | | | | | | | | | Выход годных партий с 1-го контроля | |
|---------------------------------|-----------------|----------|-------------------------------|-------------------|------|------------|-------------------|---|------------|-------------------|-----|----|------|----|-------------------------------------|-----|
| | партий | образцов | О | | S | | Глобули | | O+S+Г | | шт. | % | | | | |
| | | | сред. балл | образцы с выпадом | | сред. балл | образцы с выпадом | | сред. балл | образцы с выпадом | | | | | | |
| | | | | шт. | % | | шт. | % | | шт. | | | % | | | |
| 1 вариант (12 плавков) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| I | 5 | 36 | 1,74 | — | — | 1,75 | — | — | 1,75 | — | — | — | — | — | 5 | 100 |
| II | 2 | 12 | 2,25 | — | — | 2,0 | — | — | 2,0 | — | — | — | — | — | 2 | 100 |
| III | 5 | 36 | 2,40 | 5 | 13,8 | 2,17 | — | — | 2,22 | 2 | 5,6 | 7 | 19,4 | 4 | 80 | |
| IV | 1 | 12 | 1,75 | 1 | 8,3 | 1,5 | — | — | 1,54 | — | — | 1 | 8,3 | 1 | 100 | |
| V | 7 | 69 | 2,36 | 1 | 1,4 | 2,42 | — | — | 2,32 | 1 | 1,4 | 2 | 2,9 | 7 | 100 | |
| Σ | 20 | 165 | | 7 | 4,2 | | | | | 3 | 1,8 | 10 | 6,0 | 18 | 90 | |
| 2 вариант (24 плавки) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| I | 21 | 144 | 1,80 | — | — | 1,70 | — | — | 1,69 | — | — | — | — | — | 21 | 100 |
| II | 3 | 18 | 1,5 | — | — | 1,50 | — | — | 1,5 | — | — | — | — | — | 3 | 100 |
| III | 12 | 81 | 1,91 | 2 | 2,5 | 1,96 | — | — | 1,91 | 3 | 3,7 | 5 | 6,2 | 11 | 92 | |
| IV | 5 | 37 | 2,55 | 1 | 2,7 | 2,16 | — | — | 2,24 | — | — | 1 | 2,7 | 5 | 100 | |
| V | 11 | 94 | 2,43 | 1 | 1,1 | 2,46 | — | — | 2,26 | 3 | 3,2 | 4 | 4,3 | 11 | 100 | |
| Σ | 52 | 374 | | 4 | 1,1 | | | | | 6 | 1,6 | 10 | 2,7 | 51 | 98 | |
| Σ 36 плавков | | | | | | | | | | | | | | | | |
| I+V | 72 | 539 | | 11 | 2,0 | | 0 | 0 | | 9 | 1,7 | 20 | 3,7 | 69 | 95,8 | |
| | | | | O | S | Гл. | | | | | | | | | | |
| * I группа — профиль до 40 мм: | | | | 2,0 | 2,0 | 2,0 | | | | | | | | | | |
| V группа — профиль более 80 мм: | | | | 3,0 | 3,0 | 3,0 | | | | | | | | | | |

талла методами математической статистики выполнена выборка показателей металла I и V групп, как наиболее различающихся по балльной оценке. Используя метод Шовене, исключая показатели, резко отличающиеся от усредненных значений (наличие шлаковых включений, поля зрения с баллом $\geq 4,0$), были сформированы массивы данных (табл. 5).

Оценка принадлежности статистической выборки показателей к одной генеральной совокупности с использованием критерия Фишера позволяет сделать заключение об отсутствии статистических различий двух технологических вариантов. Как видно из приведенных результатов статистической обработки, оба технологических варианта обеспечивают 100 %-ный показатель выхода годного с первого контроля как по I, так и по V группе ГОСТ 801 – 78 (что также подтверждается данными табл. 4). В то же время металл варианта 2 (присадки MnC17 в печь) хотя и характеризуется более высоким разбросом усредненных значений баллов и большей абсолютной их величиной, тем не менее имеет большой запас надежности по показателю глобулярные включения, значения которого наиболее жестко регламентированы требованиями ГОСТ 801 – 78.

Присадка ферросиликомарганца MnC17 в печь создает предпосылки для дальнейшего совершенствования технологии выплавки и рафинирования стали с ориентиром на соответствие сортового проката нормам ASTM E-45 (метод A) — оценка по наихудшему полю (табл. 6). В нормах американского стандарта ASTM E-45, метод испытаний A, более детализирован контроль природы неметаллических включений (A — сульфиды, B — оксиды алюминия, C — силикаты, D — глобули) и их формы — тонкие и толстые.

Как видно из данных табл. 6, металл, выплавленный с применением MnC17, в целом соответствует нормам ASTM E-45 (метод испытаний A) и его качество по содержанию и составу неметаллических включений расширяет экспортные возможности ОАО “Днепроспецсталь” для рынка стран, ориентированных на применение американских стандартов оценки качества металлопродукции.

Эффективность разработанной технологии производства подшипниковых сталей, защищенной патентом Украины [6], подтверждается результатами слаточного контроля качества металла по неметаллическим включениям.

Таблица 5. Обобщенные результаты качества металла опытных плавков

| Вариант технологии | Группа по ГОСТ 801 – 78 | Количество образцов | Включения | | |
|--------------------|-------------------------|---------------------|-----------|-----------|-----------|
| | | | O | S | Глобули |
| 1 (MnC17 в ковш) | I | 57 | 1,90±0,03 | 1,70±0,03 | 1,92±0,04 |
| | У | 149 | 2,20±0,04 | 2,21±0,03 | 2,14±0,03 |
| 2 (MnC17 в печь) | I | 60 | 1,97±0,06 | 1,96±0,06 | 1,88±0,07 |
| | У | 153 | 2,36±0,04 | 2,32±0,03 | 2,13±0,03 |

Таблица 6. Результаты оценки неметаллических включений в стали ШХ15СГ-В, выплавленной с применением ферросиликомарганца MnC17 (ДСТУ 3547 – 98) при слаточном (по ГОСТ 801 – 78) и исследовательском контроле по ASTM E-45 (метод А)

| Индекс штанги | по ГОСТ 801 – 78 | | | по ASTM E-45, метод А | | | | | | | |
|------------------|------------------|-----|-----|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | О | S | СН | Атн | Атл | Втн | Втл | Стн | Стл | Дтн | Дтл |
| Квадрат 106 мм | | | | | | | | | | | |
| А1 | 2,0 | 1,5 | 2,0 | 0,5 | 0 | 1,5 | 1,0 | 0 | 0 | 0,5 | 0 |
| С1 | 2,0 | 1,5 | 2,0 | 0,5 | 0 | 1,5 | 1,0 | 1,0 | 0 | 0,5 | 0,5 |
| Н1 | 2,0 | 1,5 | 2,0 | 0,5 | 0 | 1,0 | 1,0 | 0 | 0 | 1,0 | 0,5 |
| А15 | 2,0 | 1,5 | 2,0 | 0,5 | 0 | 1,5 | 1,0 | 0 | 0 | 0,5 | 0 |
| С15 | 2,0 | 1,5 | 2,0 | 0,5 | 0,5 | 1,0 | 1,0 | 0 | 0 | 1,0 | 0,5 |
| Н15 | 2,0 | 1,5 | 2,0 | 0,5 | 0,5 | 1,0 | 1,0 | 0 | 0 | 1,0 | 0,5 |
| А16 | 2,0 | 1,5 | 2,0 | 0,5 | 0,5 | 2,0 | 2,0 | 0 | 0 | 0,5 | 0,5 |
| С16 | 2,0 | 1,5 | 2,0 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 1,0 | 0 | 0 | 0,5 | 0,5 |
| Н16 | 2,0 | 1,5 | 2,0 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 1,0 | 0 | 0 | 0,5 | 0,5 |
| Средний балл | | | | 0,5 | 0,3 | 1,4 | 1,1 | 0,1 | 0 | 0,7 | 0,4 |
| Круг 30 мм | | | | | | | | | | | |
| 1 | 2,0 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0 | 1,5 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | 0 |
| 2 | 2,0 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0 | 1,0 | 1,0 | 0 | 0 | 0,5 | 0 |
| 3 | 2,0 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0 | 1,0 | 0 | 0 | 0 | 0,5 | 0 |
| 4 | 2,0 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0 | 1,0 | 0,5 | 0 | 0 | 0,5 | 0,5 |
| 5 | 2,0 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0 | 1,5 | 1,0 | 0 | 0 | 0,5 | 0,5 |
| 6 | 2,0 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0 | 1,5 | 1,0 | 0 | 0 | 0,5 | 0,5 |
| Средний балл | | | | 0,5 | 0 | 1,3 | 0,6 | 0 | 0 | 0,5 | 0,5 |

* Нормы ASTM E-45, метод А, соответствующие требованиям ГОСТ 801 – 78 для металла I группы:

| Атн | Атл | Втн | Втл | Стн | Стл | Дтн | Дтл |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 2,0 | 1,5 | 1,5 | 1,0 | 0 | 0 | 1,0 | 1,0 |

Приведенные в табл. 6 данные свидетельствуют, что разработанная технология производства подшипниковых сталей обеспечивает не только формфактор включений при контроле качества металла по методике ASTM E-45 (метод А), но и, что более важно, стабилизацию качества металла по нормативным требованиям ГОСТ 801 – 78.

Выводы

1. Широкомасштабное освоение выплавки и рафинирования подшипниковой стали ШХ15СГ-В в дуговых электропечах ДСП-60 показали высокую эффективность технологии с применением в качестве легирующего ферросиликомарганца MnC17 взамен высокоуглеродистого ферромарганца и ферросилиция ФС65.

2. Выход годного партий сортового проката с первого слаточного контроля опытных плавов с ферросиликомарганцем повысился до 90 – 98 % против 60 – 75 % по действующей технологии.

3. Применение ферросиликомарганца MnC17 и ферросилиция ФС65 для корректировки химического состава стали по содержанию кремния снижает общий расход ферросплавов до 21,5 кг/т. Суммарный расход ферросплавов (ФМн78 и ФС65) при разделъ-

ном легировании стали марганцем (ФМн78) и кремнием (ФС65) по ранее действовавшей технологии составлял 25,3 кг/т.

Библиографический список

1. Сальников А. С., Логозинский И. Н., Гасик М. И. Сравнительное исследование влияния шамотного и высокоглиноземистого (импортного) сифонных огнеупорных изделий на загрязненность заготовок и сортового проката стали ШХ15СГ-В неметаллическими включениями // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2007. № 5. С. 27 – 36.
2. Панченко А. И., Сальников А. С., Логозинский И. Н. и др. Сравнительные опытно-промышленные исследования влияния 65 %-го ферросилиция с различным содержанием кальция на загрязненность стали ШХ15СГ-В глобулярными алюмокальциевыми включениями // *Современная электрометаллургия*. 2007. № 4. С. 49 – 55.
3. Панченко А. И., Логозинский И. Н., Сальников А. С. и др. Опытное-промышленное освоение сквозной технологии электроплавки конструкционной стали с применением ферросиликомарганца // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2011. № 6. С. 17 – 21.
4. Гасик М. И., Горобец А. П., Панченко А. И. и др. Теоретические предпосылки процессов формирования оксидных и глобулярных неметаллических включений при различных остаточных содержаниях кальция и алюминия // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2008. № 1. С. 48 – 54.
5. Пат. № 98284 Украины. МПК С 21 С 7/06. Способ выплавки подшипниковой стали / Гасик М. И., Проїдак Ю. С., Панченко А. И., Сальников А. С.

 **ДНЕПРОСПЕЦСТАЛЬ**

ПАО "Электрометаллургический завод
"Днепроспецисталь" им. А. Н. Кузьмина"

Украина, 69008, г. Запорожье, Южное шоссе, дом 81

Справочная служба: +38 061 283 4309

Центральный факс: +38 061 213 1780

E-mail: info@dss.com.ua

www.dss-ua.com



1932—2012



ПРОЧНЫЙ МИР СТАЛИ И СПЛАВОВ

ПРОДУКЦИЯ

Нержавеющая сталь
Подшипниковая сталь
Инструментальная сталь
Инструментальная сталь и ПМ
Конструкционная сталь
Быстрорежущая сталь и ПМ
Жаропрочные стали и сплавы

ПРОФИЛЬНЫЙ СОРТАМЕНТ

Круги
Квадраты
Полосы
Шестигранники
Шайбы



Увеличение выхода годного металла при разливке коррозионностойких конструкционных и инструментальных сталей в изложницы без надставок

С. Г. Кийко, А. И. Панченко, И. Н. Логозинский, А. С. Сальников, Б. А. Левин, В. А. Булат, Д. В. Черенков
 ПАО “Днепроспецсталь”
 (г. Запорожье, Украина)

Внедрена технология разливки сталей в изложницы без надставок при производстве слитков массой 4,5 и 6,5 т с целью уменьшения головной обрезки и улучшения труда работников разливочных пролетов. Разработаны новые конструкции изложниц, подобраны одноразовые теплоизоляционные изделия, технология разливки сталей широкого марочного сортамента. Проведены исследования, подтверждающие соответствие внедренных технологий разливки выполнению задачи производства высококачественной металлопродукции.

Ключевые слова: разливка, слиток, прибыльная надставка, тепловставка, изложница.

В начале 1970-х гг. завод “Днепроспецсталь”, учитывая опыт западноевропейских металлургических предприятий, первым в СССР освоил производство сортовых слитков сортамента завода с применением изложниц, уширенных кверху, без надставок. В результате этого в течение многих лет значительную часть сталей широкого марочного сортамента разливали в изложницы без надставок для слитков массой 3,6 т. Специально для футеровки прибыльных частей изложниц без надставок специалистами завода были созданы уникальная технология и участок для производства теплоизоляционных элементов — прессованных песчано-древесных тепловставок. Этот специализированный участок и по сегодняшний день обеспечивает предприятие недорогими изделиями для футеровки изложниц для слитков массой 3,6 т, гарантируя независимость производства от внешних поставок теплоизоляционных вставок.

Внедренная технология производства слитков массой 3,6 т в изложницы без надставок позволила в свое время ликвидировать трудоемкие операции ремонта, обмазки и сушки прибыльных надставок, сократить затраты кранового времени на установку и снятие надставок и изложниц. Изменение конструкции слитка, связанное с отсутствием надставки, также позволило снизить массу прибыльной части, уменьшить головную обрезку слитка массой 3,6 т с 17 – 18 до 14 % и улучшить качество металлопродукции.

После реконструкции обжимного стана 1050/950 и расширения профильного сортамента завода “Днепроспецсталь” для деформационного передела на предприятии стали широко производить слитки большей массы — 4,3 и 6,5 т, которые изначально отливали в изложницы с надставками, футерованными шамотным кирпичом, при этом также выплавляли слитки массой 3,6 т. Шамотная кирпичная футеровка прибыльной надставки для слитков массой 4,3 и 6,5 т достаточно сложна в изготовлении, и требовалась высокая квалификация персонала разливочных пролетов. Ремонт изношенной футеровки был очень трудоемок и занимал значительное время на транспортировку, подмазку и сушку надставок. Еще большую трудоемкость имели операции установки на изложницу и снятия надставок с изложниц после разливки. Более того, часто из-за износа футеровки и ее некачественного ремонта требовались значительные усилия, чтобы отделить надставку от прибыльной части слитка. Это приводило к подвисянию слитков и к задержкам передачи составов изложниц в передельные цеха или на колодцы отжига в условиях нехватки кранового времени разливочного пролета. Подвисяние слитков в надставках во время кристаллизации и охлаждения приводило к возникновению значительных растягивающих усилий и образованию подголовных трещин и тем самым к увеличению внутрицехового брака.

Шагом вперед на пути совершенствования технологии разливки и уменьшения себестоимости металлопродукции на заводе “Днепроспецсталь” стало внедрение технологии применения надставок с наливной футеровкой для слитков массой 4,3 и 6,5 т. Для этого специалисты предприятия разработали специальные надставки, а также спроектировали и ввели в эксплуатацию участок по изготовлению наливных футеровок в надставках с последующей их сушкой горячим воздухом от теплогенератора. Также в состав участка входили средства смешивания, дозирования и подачи бетонов для налива футеровок.

Шаблоны для формирования рабочей поверхности футеровки имели сложную конфигурацию (рис. 1) и приближали форму полости прибыльной части к пирамидальной. Это позволило уменьшить удельную поверхность прибыльной части слитка и сократить потери тепла через наливную футеровку при практически рав-

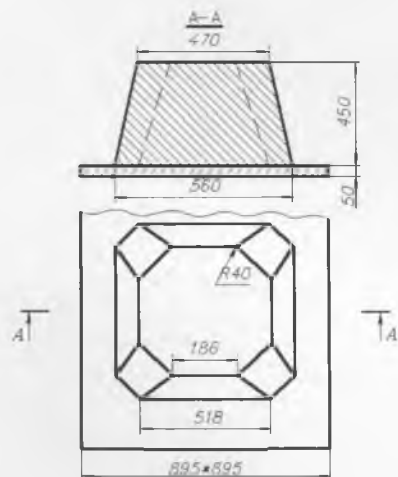


Рис. 1. Шаблон для формирования рабочей поверхности футеровки

ной теплопроводности шамотного кирпича и наливного материала. Введение ограничения на высоту налива прибыльной части наряду с уменьшением удельной поверхности и теплотеря дало возможность снизить массу прибыли слитка и уменьшить величину головной обрези в прокатном цехе с 16 до 13 – 14 % для слитков массой 4,5 и 6,5 т. Несмотря на очевидную экономическую эффективность применения наливных футеровок взамен футеровок из шамотного кирпича, оставалось еще множество узких мест, связанных с применением надставок. Так, из-за необходимости транспортировки надставок для футеровки наливными бетонами за пределы разливного пролета создавалась неблагоприятная логистическая обстановка в разливных пролетах сталеплавильных цехов. Как и прежде, футеровки требовали ремонта (подмазки), наблюдались случаи подвисания слитков в надставках с последующим образованием подголовных трещин.

Для радикального улучшения условий труда персонала разливных пролетов, снижения отбраковки металлопродукции и уменьшения ее себестоимости путем доведения выхода годного до европейских показателей было принято решение проводить отливку слитков массой 4,5 и 6,5 т в изложницы без надставок. Предпосылкой к этому стал многолетний успешный опыт эксплуатации изложниц без надставок металлургических заводов Европы и Северной Америки (США, Мексика), а также собственный опыт использования изложницы без надставки для слитка массой 3,6 т.

На первом этапе работы специалисты завода выполнили проекты изложниц без надставок для слитков массой 4,5 и 6,5 т (рис. 2 и 3). Рабочая часть новых изложниц без надставок, оформляющая тело слитка, практически полностью соответствовала рабочей части изложниц с надставками. Требовалось, чтобы конструкция верхней части изложницы, оформляющей прибыль слитка, обеспечивала механическую жесткость и целостность изложниц во время тяжелых условий эксплуатации, а также гарантировала быстрое стрипперование слитков. Для этого взята за основу конструкция верхней части изложницы для слитка

массой 3,6 т была изменена и скорректирована (в части вырезов для стрипперования, их размеров, переходов от более массивной к менее массивной стенке) с учетом большего разведения клещей стрипперного механизма (по сравнению со слитком массой 3,6 т). Проектирование этих изложниц было направлено на создание конструкции сменного оборудования без изменения конструкции стрипперного крана.

Заказы на изготовление изложниц без надставок для слитков массой 4,5 и 6,5 т размещали на предприятиях Украины, России, Германии, что дало возможность испытать новую конструкцию на опытных партиях изложниц различных производителей, отлитых из различных видов чугуна (передельного, синтетического электродуговых и индукционных печей) с применением различных технологий литейной формы. Поиск наиболее приемлемых поставщиков изложниц без надставок продолжается.

Параллельно с проектированием изложниц и выбором их поставщика выполняли работы по поиску и разработке технологии футеровки прибыльной части слитков. Отказались от решения, используемого некоторыми металлургическими предприятиями, которое состоит в наливе футеровочного материала из ЖСС (жидкой самотвердеющей смеси). Данная технология требует строительства смесеприготовительного отделения, участка формовки и имеет сложности при работе в условиях отрицательных температур окружающей среды.

Разработанная на заводе технология производства песчано-древесных тепловставок для слитка массой 3,6 т, отливаемого в изложницы без надставок, была опробована для изготовления тепловставок для слитков массой 4,5 и 6,5 т. Было изготовлено и опробовано новое оборудование для производства тепловставок для слитка массой 4,5 т, так как с его использованием можно производить большую часть профильного сортамента. Песчано-древесную смесь применяли в качестве материала для тепловставок для слитка массой 4,5 т, как и для слитка массой 3,6 т. Полученные тепловставки соответствовали конструкции изложницы

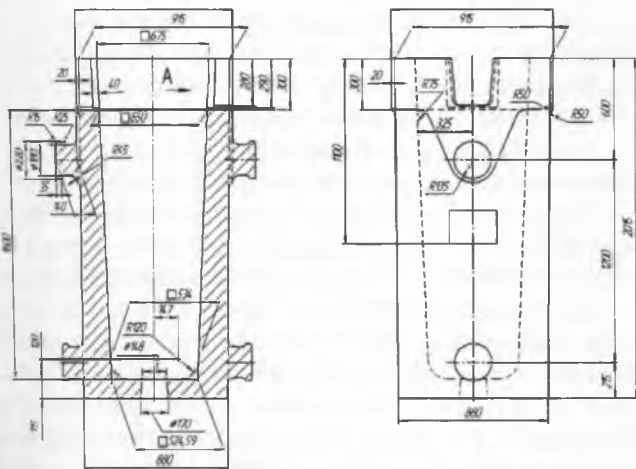


Рис. 2. Изложница для слитка массой 4,5 т

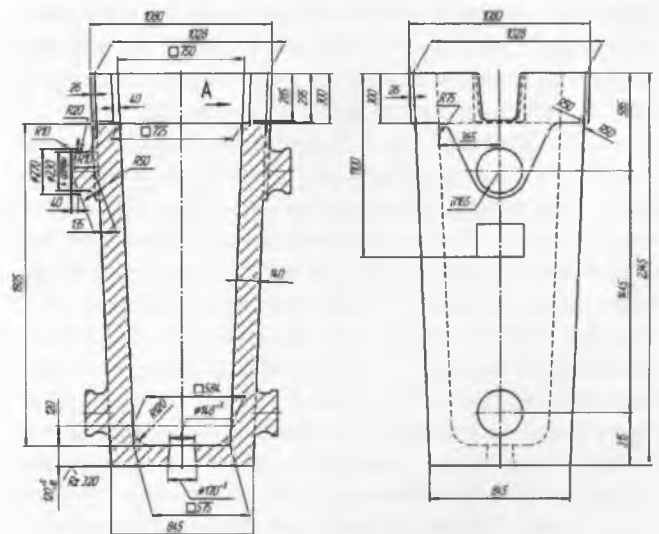


Рис. 3. Изложница для слитка массой 6,5 т

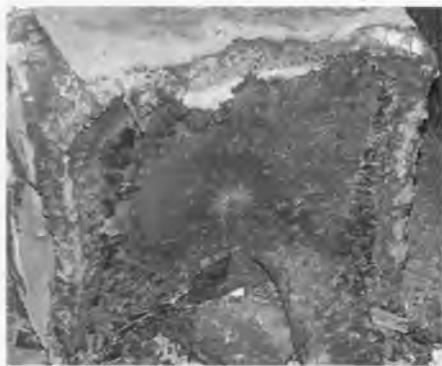


Рис. 4. Прибыльная часть слитка

для слитка массой 4,5 т и при их применении не имели замечаний по аварийным потерям металла.

Испытанные тепловставки при выполнении требований к качеству металлопродукции дали возможность снизить головную обрезь слитков массой 4,5 т до 11,74 %. Недостатком указанных изделий являлась их значительная масса (до 6,5 кг), что приводило к значительному повышению трудоемкости при их монтаже в изложницы. По этой причине основным поставщиком материалов для футеровки прибыльных частей слитков без надставок массой 4,5 и 6,5 т был выбран известный европейский производитель — фирма “Foseco Steel” (“Vesuvius”), являющаяся поставщиком подобных изделий на ряд металлургических предприятий России [1, 2]. Данная фирма предложила восьмиэлементные системы футеровки прибыльных частей изложниц, состоящих из четырех высокотеплоизолирующих плит “Litefax” и четырех угловых элементов “Profax”. Плиты “Litefax” имеют крючки, которыми закрепляются за верхний торец изложницы, что исключает необходимость удерживать их на нужном уровне и в положении какими-либо другими способами. Также не требуется особая точность в размещении тепловставок по граням изложницы, так как установка угловых элементов (клиньев) обеспечивает симметричное положение всех элементов внутри изложницы. После установки угловые элементы вклинивают между тепловставками последовательными несильными ударами молотка по каждому угловому элементу до совмещения нижнего торца углового элемента с нижним торцом тепловставок.

Таким образом, при минимальных усилиях персонала за 1 – 2 мин прибыльная часть изложницы футеруется высокотеплоизоляционными изделиями, составляющими многоэлементную, но очень жесткую конструкцию. Данная конструкция способна с легкостью выдержать не только транспортировку изложниц, но и гидростатическое давление, температурное воздействие жидкого металла при наполнении прибыльной части слитка, а также удары пакетов с экзотермическими смесями во время утепления. Значительно упрощается контроль качества футеровки, единственным критерием которого является положение нижних торцов угловых элементов в отличие от расклинивания вставок деревянными клиньями, ког-



Рис. 5. Поперечное сечение слитка стали 08X18H10T в подготовленной зоне

да жесткость расклинивания и правильность установки системы утепляющих изделий определяются глубиной внедрения угловых элементов. Из-за отсутствия деревянных клиньев для расклинивания тепловставок исключается контроль их влажности для недопущения кипения и выбросов металла.

Кроме достоинств технологичной и качественной установки в полость изложницы, тепловставки “Litefax” обладают рядом физических свойств, необходимых для достижения увеличения выхода годного при производстве слитков массой 4,5 и 6,5 т. Указанные изделия обладают низкой плотностью материала (0,6 г/см³), обеспечивающей сохранение тепла прибыльной части слитков, и достаточной жаростойкостью (в течение 20 – 30 мин) до момента формирования прочной корки металла на боковой поверхности прибыльных частей слитков, что также является залогом отсутствия аварийных потерь металла через окна стрипперования в результате проедания жидким металлом тепловставок.

Свидетельством хорошей тепловой работы тепловставок является практически горизонтальная площадка верхнего торца слитка (рис. 4). Отсутствие намерзания металла на тепловставки до окончания питания жидким металлом кристаллизующихся объемов слитка позволяет говорить о более эффективной работе прибыльной части слитка с применением тепловставок по сравнению с ранее существовавшей технологией с использованием надставок с наливной футеровкой. Данный факт указывает на возможность экономии металла, затрачиваемого на формирование прибыльной части слитка, и повышения выхода годного. На рис. 5 показано поперечное сечение слитка из стали 08X18H10T в подготовленной зоне. Поперечное сечение слитка не имеет усадочных дефектов.

Проведено ультразвуковое исследование глубины залегания усадочных дефектов коррозионностойких сталей. Работа состояла в ультразвуковом контроле головной обреза слитков массой 4,5 и 6,5 т, отлитых в изложницы без надставок с применением теплоизолирующих плит “Litefax” производства фирмы “Foseco Steel” (“Vesuvius”). Головная обрезь составляла 14,5 % от общей длины раската, т. е. соответствовала ранее действующим требованиям. После зачистки поверхности раската головной обреза проводился ультразву-

ковой контроль металла. Отсутствие сигнала прибора о наличии дефектов фиксировалось на уровне, соответствующем значению 11 – 12 % от общей массы слитка. Из участка металла, находящегося непосредственно под точкой поступления сигналов от дефекта и ниже, отбирали пробы для контроля макроструктуры, механических свойств и химического анализа. Контроль всех проб макроструктуры головной обрезки до уровня 12 % имел положительные результаты. Механические свойства металла и химический состав по сечению проб соответствовал требованиям технических условий.

На основании проведенных исследований величина головной обрезки была уменьшена с 14,5 % от массы слитка (ранее действующая норма для слитков массой 4,5 и 6,5 т) до 12,5 %. Уменьшение массы прибыльной части слитка с последующим снижением головной обрезки позволило получить значительную экономию металла при производстве как сорта, так и заготовки на стане 1050/950. Данные по снижению фактического расходного коэффициента для сорта (числитель) и заготовки (знаменатель) из коррозионностойкой, конструкционных легированной и углеродистой, а также инструментальной легированной сталей приведены ниже:

| Группа сталей | Фактический расходный коэффициент до/после внедрения технологии производства слитков без надставок | |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| | сорт | заготовка |
| | Коррозионностойкие | 1,236/1,225 |
| Конструкционные легированные | 1,239/1,226 | 1,223/1,210 |
| Конструкционные углеродистые | 1,236/1,226 | 1,223/1,210 |
| Инструментальные легированные | 1,251/1,237 | 1,233/1,222 |

Кроме материалов фирмы “Foseco Steel” (“Vesuvius”) также были испытаны тепловставки других производителей. По результатам испытаний тепловставки производства “Foseco Steel” (“Vesuvius”) были признаны более технологичными. В качестве утепляющих экзотермических смесей для слитков массой 4,5 и 6,5 т на заводе “Днепроспецсталь” применяют смеси собственного производства, такие как люнкерит Л-35 АПС и смесь № 13. Данные высокоэффективные сме-

си хорошо зарекомендовали себя ранее для разливки стали в изложницы с надставками. Использование этой технологии утепления для производства слитков, отливаемых в изложницы без надставок, позволило обеспечить качество металлопродукции и снизить расходный коэффициент, а также уменьшить зависимость завода от внешних поставщиков.

Выводы

1. ПАО “Днепроспецсталь” успешно завершило переход от технологии применения изложниц с надставками для слитков массой 4,5 и 6,5 т к более прогрессивной технологии отливки в изложницы без надставок.

2. Результатом внедрения технологии производства слитков массой 4,5 и 6,5 т в изложницы без надставок стало увеличение выхода годного при разливке коррозионностойких, конструкционных и инструментальных сталей.

3. Применение изложниц без надставок позволило улучшить условия труда работников разливочных пролетов, а также привело к улучшению логистической ситуации в сталеплавильных цехах.

4. Металлопродукция, полученная из слитков массой 4,5 и 6,5 т, отлитых в изложницы без надставок, полностью соответствует требованиям, предъявляемым к качеству.

5. Использование утепляющих смесей собственного производства, наличие оборудования и технологий для изготовления теплоизоляционных вставок в условиях завода, а также возможность их закупки у различных производителей делает производство слитков без применения надставок менее зависимым от колебаний рынка.

Библиографический список

1. Воробьев Ю. П., Соколов А. И., Шкробов С. Н. и др. Совершенствование технологии сифонной разливки стали на заводе “Петросталь” // Сталь. 2005. № 11. С. 36 – 40.
2. Фукс Э., Савицкий Й., Райко В. и др. Применение теплоизоляционных и экзотермических материалов фирмы “Foseco Steel” в ОАО “МЗ Камасталь” // Сталь. 2006. № 11. С. 46 – 50.

Опыт использования сифонных изделий высокоглиноземистого состава при разливке сталей сортамента ПАО "Днепроспецсталь"

А. И. Панченко, И. Н. Логозинский,
А. С. Сальников, В. М. Старшиков,
В. П. Степанова, И. П. Зализняк
ПАО "Днепроспецсталь"
(г. Запорожье, Украина)

Обобщены результаты применения огнеупорных изделий высокоглиноземистого состава для сифонной разливки сталей сортамента ПАО "Днепроспецсталь", рассмотрены структура и характеристика применяемых сифонных огнеупоров, представлены фотографии литников после разливки отдельных марок сталей.

Ключевые слова: сифонная разливка, сифонная проводка, слиток, литниковая система, неметаллические включения.

Одним из параметров, определяющих качество стали, является загрязненность сортовой металлопродукции неметаллическими включениями (НВ). Чистота сортовой металлопродукции от загрязнений неметаллическими включениями в значительной степени зависит от способов выплавки и разливки, применения различных технологических приемов для получения металла, определяемого нормативной документацией (НД) качества.

При сифонной разливке металл, выплавленный с соблюдением всех требований технологического процесса, контактирует с огнеупорной литниковой системой, поэтому определенная загрязненность металла экзогенными включениями зависит от материала сифонной проводки и степени очистки литниковых каналов после сборки составов под разливку. Помимо устойчивости сифонных огнеупоров к воздействию металлического расплава при разливке, изделия литниковой системы должны обеспечивать надежность сифонной разливки сталей без возникновения аварийных ситуаций от прорывов огнеупора металлом.

Традиционным материалом для сифонной проводки на ПАО "Днепроспецсталь" являются шамотные изделия марки ШС-32, изготавливаемыми Запорожским огнеупорным заводом (ПАО "Запорожогнеупор") согласно требованиям ГОСТ 11956:2006. Внедрение на заводе технологии производства высококачественных сталей с внепечной обработкой металла на установке ковш-печь и вакууматоре, ужесточение требований потребителя к качеству металла потребовало замены шамотных сифонных огнеупоров на более качественные изделия высокоглиноземистого состава.

На ПАО "Днепроспецсталь" сталь разливают сифонным способом в слитки массой от 1,0 до 6,5 т. Сборка составов под разливку сталей в слитки массой 3,8 т проводится традиционным способом согласно действующим на заводе технологическим инструкциям по схеме 4 + 4 + 4 + 3 + 1 (+ 1 — при необходимости) с использованием комплекта сифонных огнеупоров, состоящего из литниковой воронки, центральной трубки, звездочки, проходной (пролетной) трубки, концевой сифона и стаканчика для изложницы.

После сборки состава во дворе изложниц каналы литниковой системы продувают сжатым воздухом, повторная продувка литниковой системы проводится в разливочном пролете цеха при подготовке состава под разливку плавки. Диаметр каналов литниковой системы состава под разливку сталей в слитки массой 3,8 т составляет: 100 мм на участке центровая — звездочка, 50 мм — в лучах — участке проходного и концевой сифона. Общая длина литниковой системы, контактирующей с жидким металлом, составляет ~ 3,5 м. Характеристика применяемых сифонных огнеупоров на ПАО "Днепроспецсталь" представлена в таблице.

Для контроля металлургических дефектов в сортовой металлопродукции сортамента завода в металлографической лаборатории ЦЗЛ исследовали образцы сифонных изделий марок ШС-32, VML-65 и EX-72 (рис. 1 — 3). Структуру материала в виде энергодисперсионных рентгеновских спектров изучали на электронном микроскопе "SUPRA 40 WDS" с программой обработки изображений "CAMEO"*.

Огнеупорная продукция немецкой фирмы "LWB Refractories" отличалась высоким содержанием огнеупорного оксида Al_2O_3 , низким содержанием оксидов кремния SiO_2 , высокой плотностью изделий. Конст-

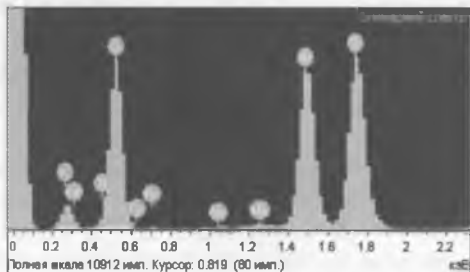


Рис. 1. Энергодисперсионный спектр образца сифонного изделия марки ШС-32. Элемент, мас./ат. %: О — 58,28/71,35; Na — 0,11/0,9; Mg — 0,32/0,26; Al — 16,42/11,92; Si — 21,62/15,08; К — 0,47/0,24; Са — 0,27/0,13; Ti — 0,85/0,35; Fe — 1,66/0,58

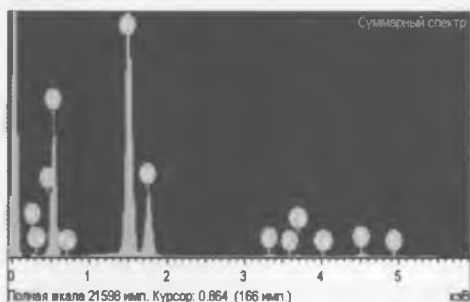


Рис. 2. Энергодисперсионный спектр образца сифонного изделия марки EX-72. Элемент, мас./ат. %: О — 55,56/68,75; Al — 29,89/21,93; Si — 11,42/8,05; К — 0,36/0,18; Са — 0,20/0,10; Ti — 1,28/0,53; Fe — 1,28/0,46

* В работе принимали участие Ю. Н. Бортников, Е. В. Бончева, И. В. Таранец.

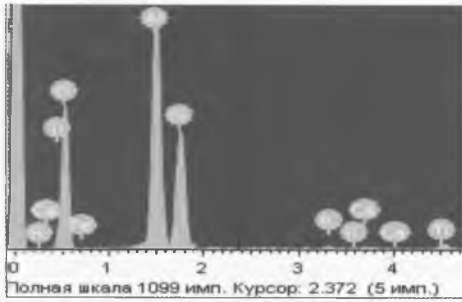


Рис. 3. Энергодисперсионный спектр образца сифонного изделия марки VML-65: элемент, мас./ат. %: Al — 27,41/20,84; Si — 20,42/14,92; K — 0,40/0,21; Ca — 0,23/0,12; Ti — 1,39/0,60; Fe — 1,09/0,40; O — 49,06/62,92

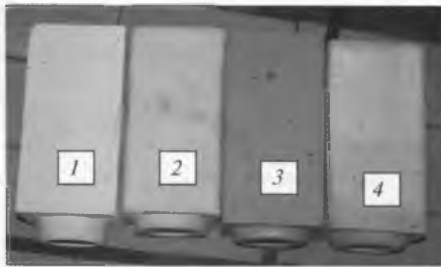


Рис. 4. Внешний вид проходного сифона (трубка пролетная) различных марок: 1 — LWB (200D20U); 2 — “Keravit”/“Galico” (C1/200); 3 — МКС-72 (С70-200); 4 — ШС-32 (С70-200)

руктивно изделия имели более надежное замковое соединение за счет увеличенного размера глубины паза и высоты бурта (23,0 – 23,5 мм против 10 – 12 мм у отечественных изделий), что практически исключает аварийный выход металла по стыку и позволяет проводить наборку сифонной проводки без применения огнеупорной массы (рис. 4).

Высокое качество изделий и надежная упаковка обеспечивали 100 %-ное использование огнеупоров в производстве без дополнительной отбраковки. Также отмечалось улучшение качества подшипниковой стали ШХ15СГ по неметаллическим включениям (НВ). При оценке сортового проката по заказам I группы (ГОСТ 801–78) было установлено, что металл, разлитый через высокоглиноземистую сифонную проводку, имел меньшее количество образцов с выпадами, что подтвердилось также выходом годного с первого контроля. Отсутствие аварийных ситуаций прорыва сифонной проводки, повышение качества металла позволили внедрить в производство высокоглиноземистые сифонные изделия марки Exakta/Norma-72 фирмы “LWB Refractories”, но только для определенной группы сталей.

Серийное использование импортных огнеупоров для сифонной разливки подшипниковых сталей показало увеличение удельных расходов и привело к необходимости поиска альтернативных поставщиков данного вида продукции. В качестве альтернативных видов сифонных огнеупоров были испытаны две опытные партии сифонных изделий марки VML-65 поставки фирмы “Galico” (производство фирмы “Keravit”, Чехия), в количестве 37,8 и 40 т.

Конструктивно “замковое” соединение обеспечивало надежность стыковки изделий в луче, однако

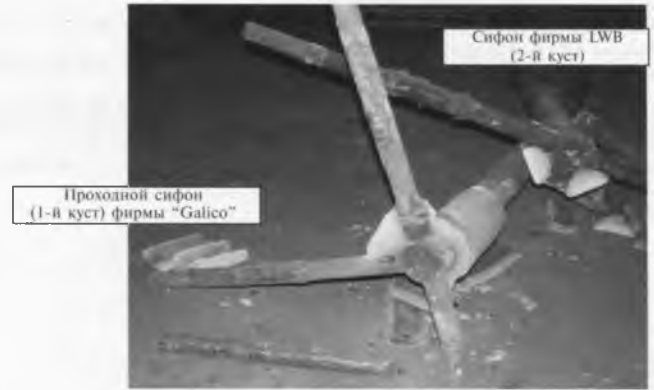


Рис. 5. Металлические литники после разливки стали ШХ15СГ



Рис. 6. Внешний вид литников после разливки стали ШХ15СГ через сифонную проводку марки VML-65 фирмы “Galico”

после разливки на металлических литниках отмечались поперечные “гребешки” и “кольца”, что указывало на недостаточную стыковку, обусловленную нестабильной конфигурацией изделий при пластическом способе прессования (рис. 5, 6). Всего с применением сифонных огнеупоров марки VML-65 было разлито 67 плавков подшипниковых и 10 инструментальных сталей (в основном марки 4Х5МФС). Качество металла по НВ соответствовало требованиям НД.

В качестве альтернативного вида сифонных огнеупоров высококачественного состава испытывали сифонные изделия марки МКС-72 предприятия СД 18-914 ПАО “Запорожогнеупор”. Технология производства сифонных изделий марки МКС-72 всех типоразмеров, входящих в комплект для набора сифонной проводки, разрабатывалась предприятием СД 18-914 ПАО “Запорожогнеупор” с учетом результатов тестирования каждой опытной партии. С применением в сифонной проводке огнеупоров марки МКС-72 было разлито 22 плавки подшипниковых и 7 плавков инструментальных сталей. Качество металла опытных плавков соответствовало требованиям НД.

При сравнении качества подшипниковых сталей ответственного назначения было установлено, что наиболее высокий выход годного с первого контроля отмечается при разливке металла через сифоны марки Exakta/Norma 72 фирмы “LWB Refractories” и составляет 100 % на сталях ШХ15 и ШХ15СГ. Контроль опытных и серийных плавков показал наличие в металле оксидных (Al_2O_3), глобулярных (MgO) и сульфидных (S) включений, загрязнение которыми возможно

Качественные характеристики огнеупорных сифонных шамотных и высокоглиноземистых (муллитовых) изделий, применяемых на ПАО «Днепро-специсталь»

| Показатель | Огнеупоры | | | | |
|-------------------------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------|
| | шамотные (ГОСТ 11586) | | высокоглиноземистые | | |
| Марка сифона | ШС-32 | V-ML65 | МКС-72 | N72 | Ex72 |
| Химический состав, %: | | | | | |
| Al ₂ O ₃ | 38,5 – 39,5 | 65 | 72,2 – 75,2 | 79,6 | 83,1 |
| SiO ₂ | Н. д. | 1,2 | Н. д. | 15,5 | 11,5 |
| Fe ₂ O ₃ | Н. д. | Н. д. | Н. д. | 1,23 | 1,29 |
| TiO ₂ | Н. д. | Н. д. | Н. д. | 2,46 | 2,89 |
| K ₂ O | Н. д. | Н. д. | Н. д. | 0,27 | 0,21 |
| Плотность изделий, г/см ³ | 2,1 – 2,2 | 2,45 | 2,51 – 2,54 | 2,58 | 2,77 |
| Открытая пористость, % | 21 – 23 | Н. д. | 22,3 – 22,7 | 23,9 | 20,5 |
| Огнеупорность, °С | ≥ 1670 | > 1800 | ≥ 1750 | Н. д. | Н. д. |
| Механическая прочность, Н/мм ² | Н. д. | 110 | Н. д. | 70 | Н. д. |
| Дополнительная усадка, % | 0,19 – 0,22 | Н. д. | Н. д. | Н. д. | Н. д. |
| Способ изготовления | Полусухое прессование | Пластическое прессование | | Полусухое прессование | |
| Производитель | ПАО «Запорожогнеупор» | «Keravit» (Словакия) | СД18-914 ПАО «Запорожогнеупор» | «LWB Refractories» (Германия) | |

Примечание. N72: воронка, трубка центровая, звездочка, сифон концевой, стаканчик для изложницы. Ex-72: сифон проходной.



Рис. 7. Внешний вид проходного сифона С70-200 (трубка пролетная) марки ШС-32 после разливки стали ШХ15



Рис. 8. Внешний вид проходного сифона 200D50U (трубка пролетная) марки Exakta-72 фирмы LWB после разливки стали ШХ15

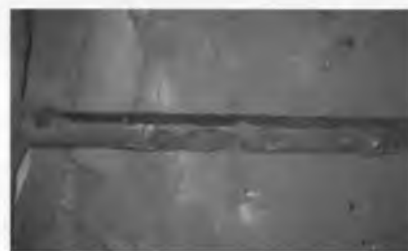


Рис. 9. Внешний вид проходного сифона С70-200 (трубка пролетная) марки МКС-72 после разливки стали ШХ15



Рис. 10. Металлические литники от проходного сифона фирмы LWB (2-й куст) после разливки стали ШХ15СГ

на всех технологических этапах выплавки, внепечной обработки и разливки стали.

Таким образом, качество металла, разлитого через сифонную проводку альтернативных марок, отвечает требованиям НД, а по характеру загрязненности неметаллическими включениями соответствует действующим плавкам, разлитым через высокоглиноземистые сифонные изделия фирмы «LWB Refractories».

Размываемость сифонной проводки после разливки плавков оценивали по состоянию металлических литников. Установлено, что размываемость сифонной проводки зависит не только от огнеупорного материала, но и от марки стали. Например, при выплавке сталей ШХ15СГ, 4Х5МФС с более высоким содержанием кремния и марганца в металле налипов огнеупорного материала на литниках значительно больше. Наибольшая огнеупорная «шуба» на литниках отмечена при разливке через шамотную сифонную проводку, наи-

меньшая — при разливке через высокоглиноземистую (муллитовую) марки Exakta-72/Norma-72 (рис. 5 – 10).

В настоящее время сифонные изделия марки Exakta-72/Norma-72 используются ПАО «Днепро-специсталь» для сборки составов для разливки подшипниковых сталей по всем заказам, изделия марки МКС-72 применяются при сборке составов для разливки сталей в слитки массой 6,5 т без прорывов и аварийных ситуаций.

Библиографический список

1. Аристов Г. Г. Огнеупорные изделия для разливки стали. — М. : Металлургия, 1969. — 261 с.
2. Валуев Д. В. Технологический процесс разливки стали. — Томск : издательство Томского политехнического университета, 2011. С. 57, 62.
3. Сальников А. С., Логозинский И. Н., Гасик М. И. Сравнительное исследование влияния шамотного и высокоглиноземистого (импортного) сифонных изделий на загрязненность заготовок и сортового проката стали ШХ15СГ-В неметаллическими включениями // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2007. № 5.

Повышение технико-экономических показателей эксплуатации конвертера газокислородного рафинирования

Р. В. Старшиков, А. Ю. Кузьменко,
В. А. Булат, А. Г. Кузнецов,
В. П. Степанова, Л. Н. Король, Л. В. Тур
ПАО “Днепроспецсталь”
(г. Запорожье, Украина)

В СПЦ-2 ПАО “Днепроспецсталь” эксплуатируется 60-т конвертер газокислородного рафинирования (ГКР) для выплавки коррозионностойких сталей. Изложены пути повышения технико-экономических показателей эксплуатации конвертера ГКР за счет совершенствования его футеровки и технологии выплавки стали.

Ключевые слова: конвертер ГКР, футеровка, периклазоизвестковые огнеупоры, стойкость, износ огнеупоров.

Действующий в СПЦ-2 ПАО “Днепроспецсталь” 60-т конвертер газокислородного рафинирования (ГКР) является основным агрегатом выплавки коррозионно-стойких сталей (КСС), в том числе с низким содержанием углерода ($\leq 0,03\%$), обеспечивающим требуемое качество и эффективность производства сортамента этих сталей. С увеличением объема выплавки КСС в конвертере (в 2011 г. более чем на 20 %), потребовалось повысить стабильность эксплуатации футеровки агрегата.

Периклазоизвестковую футеровку конвертера комплектно поставляемую фирмой “Magnesita Refractories” (Германия), постоянно совершенствовали за счет изменения ее конструкции, а также использования более износостойких огнеупоров в зонах максимального износа¹. Так, в последнее время с целью обеспечения надежной эксплуатации и повышения стойкости футеровки конвертера внедрены ряд изменений в технологию ее изготовления, а именно, в зонах максимального износа применили более износостойкие изделия периклазоизвесткового состава:

в днище вокруг продувочных фурм взамен ранее используемых изделий “Sindoform KD” внедрили изделия “Sindoform KD VT” с повышенными прочностными характеристиками;

в наиболее изнашиваемом участке (“бойной” зоне) стены повалки взамен изделий “Sindoform KD 65” применили изделия “Sindoform HD 62”, а также увеличили толщину рабочей футеровки до 750 мм для обеспечения равностойкости всех зон кладки и рабочего ресурса футеровки до конца ее эксплуатации;

увеличена толщина футеровки конвертера в горловине на стороне повалки до 450 мм.

Кроме того, с целью повышения надежности эксплуатации конвертера изменили технологию пристыковки днища конвертера к корпусу: взамен ранее используемой огнеупорной массы “Sindo Plast 409”, которая поставлялась в виде пластов толщиной ~ 60 мм и укладывалась в пристыковочный шов, не обеспечивая качественной пристыковки днища, особенно в зимнее время из-за жесткости массы, испытали разные варианты пристыковки:

применение той же массы “Sindo Plast 409”, но с укладкой ее на предварительно нагретую металлическую конструкцию днища в верхней части специальной кольцевой горелкой перед пристыковкой днища;

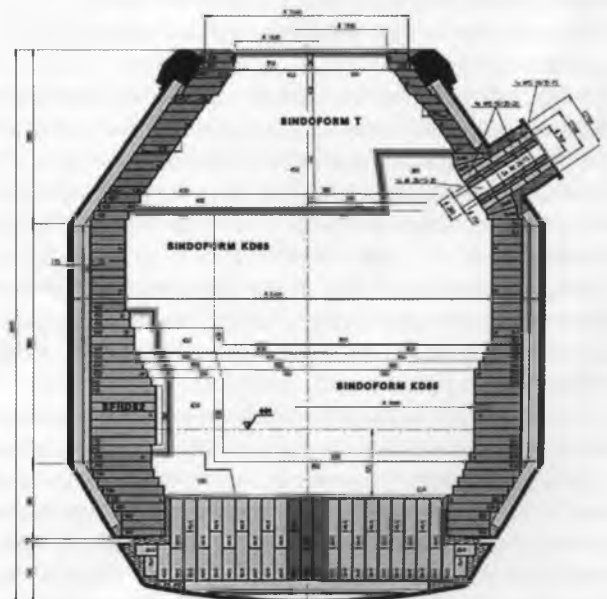
применение массы марки “Jebko DS Slab”, менее жесткой и более пластичной в сравнении с массой “Sindo Plast 409”, поставляемой в виде брусков по 25 кг с разделением на пластины толщиной от 25 до 70 мм;

с использованием массы “Sindo RAM 409”, которая насыпается на всю поверхность периферийной части днища слоем толщиной 60 – 70 мм с укладкой по краю специального уплотнительного шнура диам. ~ 50 мм в два оката.

Последний вариант, как наиболее приемлемый, внедрен в постоянное производство. В табл. 1 представлены физико-химические свойства огнеупоров, используемых в футеровке конвертера ГКР, схема футеровки показана на рисунке.

Кроме перечисленных выше изменений в футеровке конвертера с целью обеспечения ее стойкости ≥ 100 плавок, разработали и внедрили мероприятия для снижения износа футеровки:

обеспечение высокой основности шлака при выплавке с использованием общего количества извести,



Усовершенствованная схема футеровки конвертера ГКР

¹ Логозинский И. Н., Чаус А. И., Булат В. А. и др. Опробование футеровки конвертера известковопериклазовыми изделиями при выплавке коррозионно-стойких сталей // Сталь. 2002. № 9. С. 34 – 36.

Таблица 1. Качественная характеристика периклазоизвестковых огнеупоров для футеровки конвертера ГКР

| Свойства | Марка огнеупора | | | | | |
|------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|----------------|------------------|
| | Sindoform KD | Sindoform KD 65 | Sindoform HD 62 | Sindoform T | Sindoform KDVT | Kalmag TAP 99/90 |
| Химический состав, %: | | | | | | |
| MgO | 48,5 | 62,9 | 62,2 | 42,2 | 59,0 | 97,3 |
| CaO | 49,5 | 35,2 | 36,1 | 55,7 | 39,1 | 1,5 |
| SiO ₂ | 0,8 | 0,7 | 0,7 | 0,8 | 0,7 | 0,6 |
| Al ₂ O ₃ | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,5 | 0,5 | 0,2 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,6 | 0,6 | 0,5 | 0,6 | — | 0,3 |
| Mn ₃ O ₄ | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | — |
| C | — | — | — | 3,3 | — | 6,0 |
| Плотность, г/см ³ | 2,914 | 2,944 | 3,003 | 2,8 | 2,952 | 3,15 |
| Кажущаяся пористость, % | 13,4 | 13,5 | 11,7 | 12,5 | 12,8 | 7,1 |
| Предел прочности при сжатии, Н/мм ² | 69 | 69 | 88 | 56 | 56,0 | — |

Таблица 2. Данные о работе конвертера ГКР по кампаниям в 2011 г. и в первом полугодии 2012 г.

| Параметры | 2011 г., среднее значение | | 2012 г., кампания | |
|--------------------------------------------|-------------------------------|--------|-------------------|--------|
| | по 17 кампаниям (№ 345 – 361) | № 362 | № 363 | № 364 |
| Стойкость, плавки: | | | | |
| футеровки | 100,0 (86 – 113) | 100,0 | 120,0 | 101,0 |
| основного днища | 95,6 (73 – 113) | 100,0 | 120,0 | 101,0 |
| Количество днищ за кампанию, шт. | 1,2* | 1 | 1 | 1 |
| Количество плавов “тяжелого” сортамента, % | 46,3 (34,7 – 60,2) | 49,0 | 45,8 | 45,5 |
| Средняя длительность плавов, ч:мин | 1:56 мин (1:32 – 2:07) | 1:53 | 1:45 | — |
| Ритмичность работы конвертера, плавки/сут | 6,1 (4,9 – 7,6) | 4,5 | 5,6 | — |
| Горячее время работы, ч:мин | 392:10 (277:00 – 520:35) | 550:05 | 561:10 | 356:13 |

* На трех кампаниях из семнадцати заменили днище.

присаживаемой в агрегат по ходу плавки до отдачи раскислителей на уровне 145 + 5 кг/т стали;

обязательная отдача в конвертер до заливки полупродукта ~ 13,5 кг/т магнетитового порошка для обеспечения содержания оксида MgO в шлаке после его раскисления в третьем периоде в пределах 9 – 11 %;

снижение длительности третьего периода восстановительного рафинирования до ≤ 25 мин;

исключение перегрева металла в конвертере ГКР не выше 1720 °С;

выпуск отдельных сортаментных групп марок коррозионностойких сталей из конвертера без ожидания химического анализа контрольной пробы;

повышение интенсивности выплавки в конвертере за счет обеспечения ГКР полупродуктом с двух электропечей;

тщательный контроль качества изготовления металлических донных фурм для обеспечения надежной эксплуатации их до конца кампании выплавки без замены основного днища.

Постоянный анализ каждой кампании конвертера техническими работниками СПЦ-2, ЦЗЛ, руководством завода с выдачей корректирующих действий способствует получению стабильных результатов стойкости футеровки конвертера. В табл. 2 представлены результаты его работы в 2011 и 2012 гг. Максимально достигнутая стойкость футеровки конвер-

тера из периклазоизвестковых изделий производства фирмы “Magnesita Refractories” составила 120 плавов, что выше в сравнении с показателем средней стойкости за 2010 г. и в первом полугодии 2011 г. соответственно на 29 и 20 %. Для повышения эффективности футеровки конвертера планируются испытания периклазоизвестковых огнеупоров производства КНР, совершенствование конструкции футеровки днища и стен конвертера, а также применение новых марок огнеупоров.

Заключение

С целью обеспечения эффективной эксплуатации конвертера ГКР в СПЦ-2 ПАО “Днепропетросталь” постоянно совершенствуется конструкция и технология его футеровки за счет применения дифференцированной по толщине кладки и по виду используемых периклазоизвестковых огнеупоров, а также улучшения технологии выплавки стали в конвертере, что позволило впервые достичь стойкости футеровки 120 плавов, что на 29 и 22 % выше средней стойкости футеровки конвертера в 2010 и 2011 гг. Работы по повышению стойкости футеровки конвертера ГКР в дальнейшем будут направлены на поиск более эффективных видов огнеупоров для данного типа агрегатов при производстве коррозионностойких сталей.

К вопросу о реконструкции печей ЭШП

А. И. Панченко¹, Л. Б. Медовар², С. С. Казаков¹,
И. Н. Логозинский¹, С. В. Давидченко¹, А. Г. Фельков¹,
А. П. Стовпченко², В. А. Лебедь³

¹ ПАО “Днепроспецсталь” (г. Запорожье, Украина),

² ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины (г. Киев, Украина),

³ “Элмет-Рол” (г. Киев, Украина)

Обсуждены возможные направления реконструкции печей ЭШП применительно к условиям завода “Днепроспецсталь” для достижения современных требований по качеству и технико-экономическим показателям переплава.

Ключевые слова: электрошлаковый переплав, симметричный токоподвод, смена электродов, система управления, качество слитка.

Электрошлаковый переплав — это особая страница истории завода, его настоящего и будущего. Именно на “Днепроспецстали” в 1958 г. новый металлургический процесс впервые в мире сделал первый шаг из лаборатории академического института в промышленность. Сегодня ЭШП — это основа подотрасли металлургии производства металла особо высокого качества — специальной электрометаллургии, к которой относят также вакуумно-дуговой, плазменно-дуговой и электронно-лучевой переплавы, а также вакуумно-индукционную плавку. Как это часто случалось, приоритет отечественных изобретений, в том числе в металлургии, часто пытались и пытаются оспаривать. Были такие попытки и с ЭШП, но в 1969 г. в США на первой странице обложки октябрьского номера металлургического журнала “Iron Age” появилось красноречивое признание: “ЭШП из СССР” на фоне печей ЭШП типа Р-951 конструкции ИЭС им. Е. О. Патона (рис. 1).

ЭШП был отмечен Ленинской премией 1963 г.* Тогда же, с момента продажи лицензии во Францию, началось победное шествие ЭШП по миру. В те далекие годы завод “Днепроспецсталь” был безусловным

мировым лидером в области техники и технологии ЭШП. Во многом это лидирующее положение было основано на тесном сотрудничестве с научно-исследовательскими центрами всей страны и, конечно, с Институтом электросварки, где ЭШП был создан и где не прекращалось его развитие под руководством академиков Б. Е. Патона и Б. И. Медовара.

Однако за годы реформ ситуация изменилась: резко уменьшилось производство металла ЭШП не только в Украине, но и в России, прежде всего из-за сокращения оборонных заказов. В остальном мире с окончанием гонки вооружений и холодной войны производство металла ЭШП, как, впрочем, и всей специальной электрометаллургии, сократилось вначале на четверть. Однако сегодня оно постоянно увеличивается в среднем на 5 % ежегодно [1]. По некоторым данным, на пике гонки вооружений общемировое производство металла ЭШП составляло не более 1 млн т. Сегодня оно возросло втрое [2]. Время подтвердило достоинства ЭШП и его технические возможности. В целом логика развития ЭШП лежит в русле основного стратегического направления развития металлургии — увеличения доли металла особо высокого качества в общем объеме производства.

Сложившаяся ситуация и современные тенденции развития процесса ЭШП. К сожалению, в силу известных обстоятельств завод “Днепроспецсталь” (как и другие родственные предприятия бывшего СССР) вынужден эксплуатировать печи ЭШП, конструкция которых создавалась на базе технологий пятидесятилетней давности. Ситуация, возможно, не менялась бы и далее. Однако в период общемирового кризиса 2008 — 2009 гг. многие, в том числе и на “Днепроспецстали”, обнаружили, что ЭШП весьма прибылен. Более того, в связи с ограничениями, накладываемыми старой конструкцией печей ЭШП и морально устаревшими системами управления, выяснилось, что некоторые стали и сплавы не могут быть получены без реконструкции имеющегося парка оборудования. Кроме того, производственники обратили внимание на хорошо известные резервы повышения экономичности ЭШП за счет снижения удельного расхода электроэнергии и шлака, а также применения более дешевых шлаков. Все вышесказанное было положено заводом “Днепроспецсталь” и ИЭС им. Е. О. Патона в основу изыскания направления и путей реконструкции заводского парка печей ЭШП.

* Лауреатами Ленинской премии стали Б. И. Медовар, Ю. В. Латаш, Б. И. Максимович (ИЭС), Ю. А. Шульте (ЗМСИ), В. С. Култыгин (завод “Электросталь”), П. П. Менушенков (ЗМЗ) и Н. Ф. Трегубенко (завод “Днепроспецсталь”).

IRON AGE

October 6, 1969

Electrometallurgical Processes from Soviet Management Site System



Рис. 1. Печи ЭШП типа Р-951 на обложке журнала “Железный век” (США) с надписью ЭШП из СССР

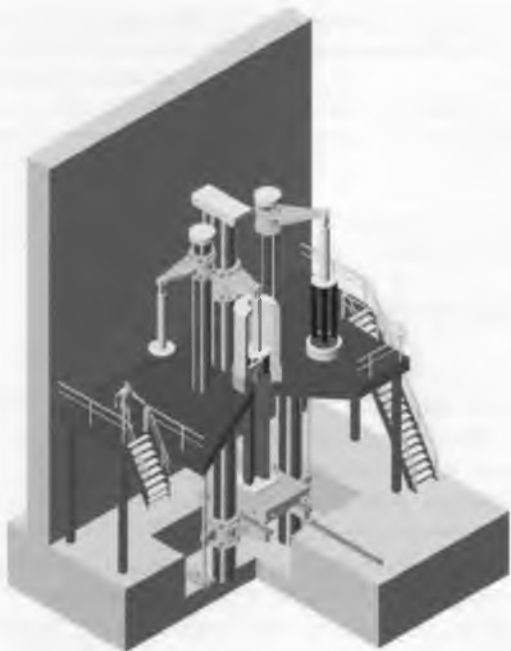


Рис. 2. Общий вид 10-т печи ЭШП со сменой электродов и защитной атмосферой

Задачи технического перевооружения и модернизации прежде всего связаны с совершенствованием и развитием технологических процессов ЭШП, определяющих изменения конструкции печей. Новые печи ЭШП, введенные в эксплуатацию в последние годы, — это в основном печи камерного типа, предназначенные для получения слитков высоколегированных сталей и суперсплавов [3 — 5]. Практически все эти печи имеют систему смены расходных электродов по ходу переплава. Схематически такая конструкция (инжиниринговой компании “Элмет-Рол” и ИЭС им. Е. О. Патона) представлена на рис. 2.

Камерные печи ЭШП позволяют вести переплав как в защитной атмосфере, так и при повышенном давлении, например в атмосфере азота для получения высокоазотистых сталей, в том числе со сверхравновесным содержанием азота. Появившееся сравнительно недавно сообщение о создании печи ЭШП с рабочим давлением 8 МПа [6] позволило уточнить требования к современным печам ЭШП и подходы к реконструкции старых [7]. Особого внимания заслуживают разработки ЭШП с двухконтурной схемой питания (ЭШП ДС), позволяющей существенно расширить возможности управления затвердеванием слитков. Однако эта система применима только при коротком токоведущем кристаллизаторе и вытяжке слитка [8].

Технические аспекты реконструкции печей ЭШП. Что необходимо для рациональной реконструкции печей ЭШП завода “Днепроспецсталь”? Какие первоочередные факторы следует при этом учесть? Ответы на эти вопросы приведены ниже. Несмотря на влияние специфики завода, выработанные подходы и рекомендации могут быть интересны и другим предприятиям, планирующим выйти на новый уровень технологии и качества слитков ЭШП.

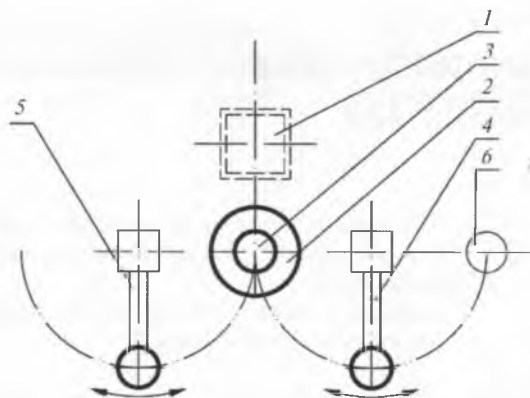


Рис. 3. Схема реализации смены электродов на стандартной печи ЭШП: 1 — колонна печи; 2 — кристаллизатор; 3 — расходный электрод; 4 — поворотный манипулятор для установки электродов; 5 — поворотный манипулятор для снятия огарков электродов; 6 — место печи подогрева концов электродов перед плавкой

Во-первых, следует определить новый уровень требований к качеству металла ЭШП и перспективный марочный сортамент. Сравнение отечественного и зарубежного сортов сталей, производимых методом ЭШП, позволяет утверждать, что количество высоколегированных сталей и суперсплавов у нас недостаточно.

Во-вторых, необходимо определить возможности реализации современных технических решений в условиях конкретного предприятия и выделить те, которые позволят максимально использовать существующее оборудование. Чаще всего трансформатор и металлоконструкции печи могут быть сохранены практически полностью (после их ревизии), а короткая сеть — лишь частично. Система управления должна быть заменена. Из технических решений, направленных на улучшение показателей печи, можно выделить следующие.

Смена электродов по ходу переплава позволяет увеличить развес слитка на существующей печи и снизить затраты на подготовку расходных электродов. Это потребует замены узла крепления и подачи электродов. На рис. 3 схематически показана реализация смены электродов по ходу переплава на печи ЭШП стандартной конструкции.

Создание симметричного токоподвода. На старых печах ЭШП токоподвод односторонний или в лучшем случае двусторонний, что приводит к выраженной асимметрии электромагнитного поля и течений шлака и металла, а в итоге — к ликвации в сложнелегированных сталях и сплавах. Для расширения сортамента металла ЭШП и увеличения развеса слитков высоколегированных сталей и сплавов необходимо создать симметричное электромагнитное поле в жидкометаллической части слитка ЭШП. Результат моделирования электромагнитного поля на современной печи ЭШП при симметричном токоподводе с четырех сторон [9] показан на рис. 4. Такое решение делает гидродинамическую картину в двухфазной области формирующегося слитка более симметричной. Практически все современные печи ЭШП оборудуют токоподводами именно такого рода.

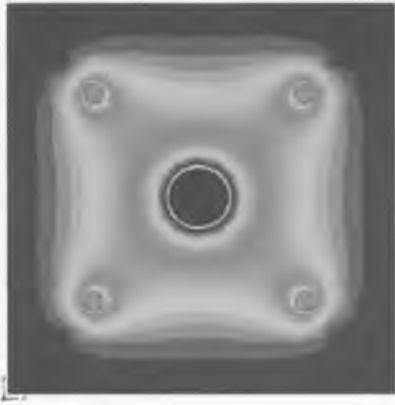


Рис. 4. Расчетная картина распределения электромагнитного поля при ЭШП с симметричным токоподводом [9]

Защита плавильного пространства. ЭШП в контролируемой атмосфере позволяет переплавлять сложнолегированные сплавы, содержащие легкоокисляемые легирующие элементы или требующие легирования азотом. Кроме того, наличие камеры позволяет реализовать ЭШП в дугошлаковом варианте [10], что экономит не менее 25 – 30 % электроэнергии. Отметим, что средний уровень удельного расхода электроэнергии на современных печах ЭШП находится в пределах 1100 – 1200 кВт · ч/т слитка, а на печах устаревшей конструкции выше 1500 – 1700 кВт · ч/т слитка, что означает потерю около 40 долл. США на каждой тонне слитка ЭШП.

Точное позиционирование электрода. При размещении электрододержателя на двухкоординатном суппорте система управления осуществляет постоянное центрирование электрода в кристаллизаторе, что улучшает симметрию тепловложения и гидродинамику в шлаковой и жидкометаллической ванне, а также металлургическое качество слитка. Кроме того, достигаются большие коэффициенты заполнения.

В-третьих, новый уровень качества слитка невозможен без создания современных систем управления печью. Это касается не обновления аппаратной части, а изменения идеологии и степени автоматизации управления печью. Так, необходим прецизионный контроль заглубления расходуемого электрода в шлак. Например, при ВДП контроль длины дугового промежутка осуществляется с точностью ± 1 мм. Такая точность контроля заглубления электрода не может быть достигнута на старых печах ЭШП, где отсутствуют датчики массы электрода (слитка), а контроль положения электрода в шлаковой ванне проводится расчетным путем. Это дает недопустимо высокую погрешность и привело к практике ведения ЭШП на

почти вдвое завышенном количестве шлака (обычно около 40 кг шлака на тонну слитка ЭШП при современном уровне 20 – 25 кг/т) и со значительным (иногда около 100 мм) заглублением электрода, при котором невозможна выплавка чувствительных к сегрегации высоколегированных сплавов.

Именно для обеспечения качества слитка необходимо вести переplав с как можно большим коэффициентом заполнения при минимально возможном заглублении электрода в шлак, а при планировании модернизации отечественных печей — как минимум реконструировать короткую сеть и создать новую систему управления.

Заключение

Времена, когда техника и технология ЭШП в Украине (и России) были предметом пристального внимания со стороны зарубежных коллег, не ушли в прошлое полностью. Такие отечественные разработки, как переplав по двухконтурной схеме, дугошлаковый переplав, электрошлаковый переplав без расходуемых электродов и получение биметаллов при ЭШП, по-прежнему не имеют аналогов в мире [10]. Вместе с тем в конструкции печей и практике ЭШП наметилось существенное отставание, требующее коренных перемен. Приведенные в данной статье соображения о направлениях реконструкции печей ЭШП и совершенствовании технологии ЭШП на заводе “Днепро-спецсталь” проходят в настоящее время всестороннее обсуждение и планируются к реализации.

Библиографический список

1. Moll M. Update on the Markets for Superalloys and Specialty Steels, Proc. of Remelting and Forging Symposium. Inteco. Shanghai, 2010. P. 46 – 72.
2. Prof. Z. Jiang. Private communication, 2010.
3. www.consarc.com.
4. web.ald-vt.de.
5. www.inteco.at.
6. An advanced pressurized electroslag remelting process approach at laboratory scale / H. Scholz, U. Biebricher, A. Carosi, D. Rossi // Proc. of 7-th Intern. Conf. of high nitrogen steels 2004 (Ostend, Belgium, Sept. 19 – 22, 2004). P. 317 – 322.
7. Меловар Л. Б., Троянский А. А., Саенко В. Я. и др. О новом подходе к конструкции камерных печей ЭШП // Современная электрометаллургия. 2005. № 2. С. 15 – 17.
8. Цыкуленко А. К., Ланцман И. А., Чернец А. В. и др. Двухконтурная схема электрошлакового переplавления расходуемого электрода // Современная электрометаллургия. 2000. № 3. С. 16 – 20.
9. Karicha A. e. a. Selected Numerical Investigation on ESR Process / Proceedings LMPC – 2007, Nancy. France (CD).
10. Zhouhua J., Zhengbang L. The Latest Development Trend of Electroslag Metallurgy Technology National Electroslag Metallurgy Academic Conferences Collections. 2008. P. 7 – 14.

Диспергирование структуры литой стали X12МФ-Ш обработкой инокуляторами в процессе ЭШП

С. В. Давидченко, И. М. Билоник,
И. Н. Логозинский, А. С. Сальников,
А. Г. Федьков, М. Ю. Яценко

ПАО «Днепроспецсталь» (г. Запорожье, Украина)

Представлены результаты исследования строения сетки эвтектических карбидов в слитках диам. 300 мм из стали X12М-Ш, выплавленных с введением инокуляторов в жидкую металлическую ванну в процессе ЭШП. Выполнена количественная оценка изменения параметров сетки эвтектических карбидов в зависимости от массовой скорости введения инокуляторов в расплав. Определены расход электроэнергии и массовая скорость направления слитка.

Ключевые слова: электрошлаковый переплав, инокуляторы, диспергирование литой структуры, сетка эвтектических карбидов, карбидная неоднородность.

Повышение требований потребителей к служебным характеристикам изделий из инструментальных сталей ледебуритного класса активизирует разработку и внедрение металлургами технологий, позволяющих влиять на измельчение зерна и уменьшение физико-химической и структурной неоднородности литого металла. Известно, что прочностные свойства ледебуритных сталей улучшаются пропорционально уменьшению размера зерна и повышению однородности распределения карбидов. Согласно данным работы [1], при снижении размеров зерна на один балл прочность сталей У12 и Р18 при неизменном распределении карбидов увеличивается на 200 – 300 Н/мм², и наоборот повышение карбидной неоднородности деформированного металла на один балл уменьшает прочность на 15 – 20 % и вязкость — на 30 – 50 %. Поэтому диспергирование литой структуры — необходимая предпосылка для создания высокой прочности.

Первичные или эвтектические карбиды в ледебуритных сталях распределяются в металлической матрице неравномерно и значительно различаются по размерам и форме. Широкий температурный интервал затвердевания и различие плотностей кристаллизующихся фаз в этих сталях дополнительно способствуют формированию карбидной неоднородности. При затвердевании по границам зерен твердого раствора образуется аустенитно-карбидная эвтектика, морфология которой сильно зависит от скорости кристаллизации. Так, например, в сталях Р6М5Ф3-МП, X12МФ-МП и других, полученных методом порошковой металлургии, вследствие высокой скорости охлаждения (10⁴ – 10⁵ °С/с) карбиды очень мелкие (2 – 3 мкм) в отличие от карбидов размером 8 – 20 мкм в стали обычного производства или электрошлакового переплава (ЭШП).

Управление затвердеванием металла — важная и актуальная задача современной специальной электрометаллургии, поскольку именно в период затвердевания происходят формирование структурных зон, сегрегация неметаллических включений, образование ликвационной неоднородности, которые не устраняются на последующих переделах [2]. Согласно теоретическим представлениям [3], с увеличением переохлаждения Δt скорость зарождения центров кристаллизации и роста кристаллов увеличивается (рис. 1). Непосредственно вблизи температуры затвердевания вещества

имеется область переохлаждения Δt_1 (интервал метастабильности расплава), в которой скорость зарождения центров кристаллизации равна нулю, но начинает увеличиваться при определенной величине переохлаждения. Переохлаждение Δt_2 , при котором начинается рост кристалла, значительно меньше интервала метастабильности Δt_1 , это означает, что образование кристалликов на готовой поверхности раздела фаз происходит намного легче, чем зарождение в объеме.

Способность к зародышеобразованию может быть значительно повышена внешним воздействием на параметры кристаллизации металла за счет создания готовых центров кристаллизации в затвердевающем сплаве [4]. Перспективным направлением улучшения структуры и свойств электрошлакового слитка является введение в расплав инокуляторов (изоморфных микрочастиц-холодильников), которые повышают степень переохлаждения расплава и создают условия для образования мелкодисперсной структуры слитка или отливки [5].

Известно, что на кристаллическую структуру сплавов можно воздействовать применением модификаторов из изоморфных кристаллов того же металла [5, 6], поскольку интенсивность зарождения центров кристаллизации резко возрастает при образовании частиц, обладающих структурным сходством с затвердевающим сплавом. При этом желательно, чтобы образование продуктов реакции, способствующих зарождению центров кристаллизации, происходило бы одновременно с формированием кристаллизующейся фазы основного метал-

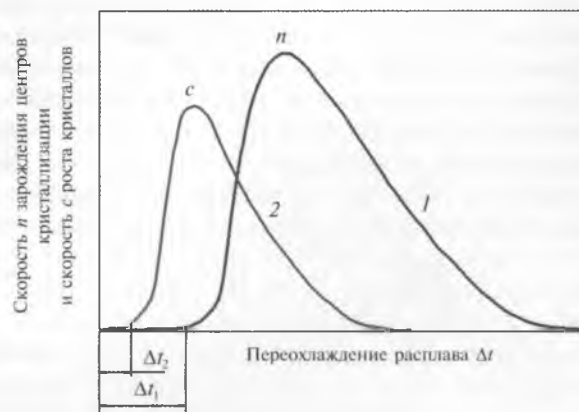


Рис. 1. Зависимости от переохлаждения Δt расплава скорости I зарождения центров кристаллизации и скорости c роста кристаллов (2)

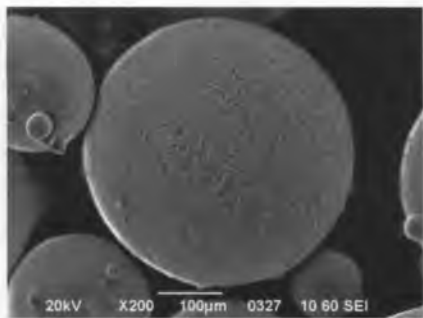


Рис. 2. Дендритная структура гранул-инокуляторов из стали X12MФ (метод получения — порошковая металлургия)

ла. Наиболее полно этому условию отвечают обломки кристаллов затвердевающего сплава, модифицирующее влияние которых обнаружено Г. Ф. Баландиным [5].

В работе [6] установлено, что при электрошлаковой плавке слитка диам. 55 мм введение 10 – 25 % инокуляторов в металлическую ванну повышает механические свойства сталей Р6М5 и X12М в 1,2 – 1,4 раза. Однако в литературе весьма мало сведений о влиянии на структуру промышленных слитков ввода изоморфных гранул-инокуляторов в металлическую ванну при ЭШП, неизвестны и технико-экономические показатели плавки.

Цель настоящей работы — экспериментальное исследование влияния введения инокуляторов в металлическую ванну при ЭШП на структуру промышленных слитков стали X12MФ, количественная оценка параметров сетки эвтектических карбидов и определение технико-экономических показателей плавки. Работа выполнялась на ПАО “Днепропетцсталь”. Электрошлаковый переплав электродов диам. 175 мм из стали X12MФ проводили на печи ОКБ 1065 в кристаллизаторе диам. 300 мм под флюсом АНФ-6. Гранулы-инокуляторы вводили в металлическую ванну в процессе ЭШП дозатором “Доза-4”. Дозатор состоит из четырех вращающихся барабанов, оборудованных шелевыми дозирующими устройствами (питателями), установленными над бункером конической формы и предназначенными для подачи порошкообразных, гранулированных легирующих материалов и раскислителей в металлическую ванну в процессе ЭШП.

Инокуляторы представляли собой изоморфные гранулы диам. 0,8 – 1,2 мм из стали X12MФ, изготовленные распылением расплава азотом по технологии цеха порошковой металлургии завода “Днепропетцсталь”. Качество гранул соответствовало требованиям для изготовления прессовок. Характерная особенность инокуляторов — их мелкодисперсная структура (рис. 2), а также низкое содержание неметаллических включений, что обеспечивается способом производства и высокой скоростью кристаллизации при производстве гранул.

Опытную работу проводили согласно требованиям заводских технологических инструкций по следующей схеме. Исходный металл для ЭШП стали X12М выплавляли в 50-т электродуговых печах с обработкой на УКП и разливкой на 1-т слитки. Затем предваритель-

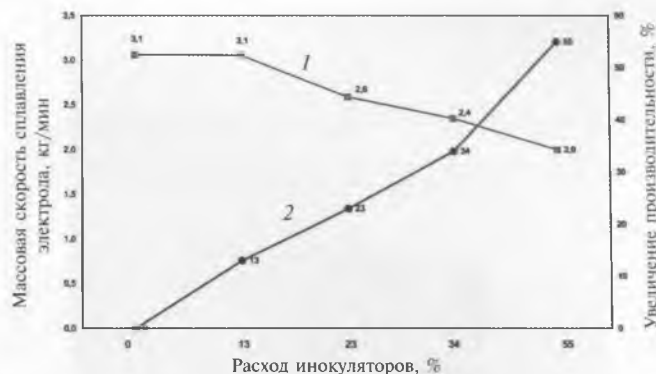


Рис. 3. Влияние ввода инокуляторов на массовую скорость направления слитка диам. 300 мм из стали X12MФ-Ш (1) и суммарную производительность процесса ЭШП (2)

но отожженные слитки ковали в кузнечном цехе на электроды диам. 175 мм. Электрошлаковый переплав электродов диам. 175 мм выполняли по стандартным электрическим режимам в соответствии с требованиями действующей технологии. В процессе ЭШП выполнили пять вариантов введения инокуляторов в расчете от массовой скорости сплавления электрода, %: 0 (стандартная технология), 10, 20, 30 и 50. Фактически при плавке опытных слитков инокуляторов внесли несколько больше, кг (%): 16,8 (13), 29,7 (23), 43,6 (34), 70,4 (55) по вариантам 2 – 5 соответственно.

Линейную скорость сплавления электрода по каждому варианту фиксировали с помощью электронного устройства контроля скорости сплавления электрода ЛМ.1790-1 РЭ разработки ОАО “Днепропетцсталь”, а также по каждому варианту фиксировали глубину металлической ванны с помощью вброса вольфрамовой крупки. ЭШП опытных вариантов проходил стабильно, без отклонений от заданного режима плавки. При внесении в металлическую ванну порядка 60 % инокуляторов от массовой скорости сплавления электрода зафиксированы броски рабочего тока до 1 кА с переходом плавки в нестабильный режим.

По результатам проведенных плавки установлено, что с увеличением расхода вводимых инокуляторов массовая скорость сплавления электрода снижается с 3,1 до 2,0 кг/мин, т. е. на 32 %. В то же время суммарная производительность процесса ЭШП за счет добавления инокуляторов увеличивается от 13 до 55 % (рис. 3). Расход электроэнергии с учетом массы добавленных гранул уменьшился на 8 – 16 % и находился в пределах 1345 – 1470 кВт · ч/т. При выплавке слитка диам. 300 мм и массой 1,0 т средний расход электроэнергии по стандартной технологии составляет 1600 кВт · ч/т. Один из опытных слитков представлен на рис. 4, видно, что поверхность слитка гладкая, гофры и пережимы отсутствуют.

Макроструктуру получили плотную, однородную, без ликвационных дефектов (рис. 5), ее исследовали на продольных темплетях, вырезанных по оси слитка. На рис. 6 показан макротемплет с усадкой по пятому варианту переплава. Видно, что дефектов усадки нет, высота усадочной раковины от торца слитка 20 мм



Рис. 4. Слиток диам. 300 мм из стали X12MФ-Ш, выплавленный с введением инокуляторов в процессе ЭШП

(15 кг по массе). Ниже усадки макроструктура слитка, полученного с введением инокуляторов, плотная и однородная. По стандартной технологии головная обрезь составляет по высоте слитка 90 мм (50 кг). Это дает основание предположить возможность снижения головной обрезки на 20 – 30 кг (40 – 60 %) [7]. Действие инокуляторов привело к уменьшению глубины металлической ванны: в осевой части слитка по пятому варианту плавки она составила 80 мм (рис. 5), что в 1,5 раза меньше глубины ванны в слитке, получаемом по действующей технологии.

Образцы для количественной оценки параметров сетки эвтектических карбидов по каждому варианту отбирали из центра, на половине радиуса и от края слитков. Изменение параметров сетки эвтектических карбидов оценивали с использованием компьютерной металлографии: программно-аппаратного комплекса “Видео Тест-Металл” на базе оптического микроскопа “Zeiss Axiovert 200MAT” при 50-кратном увеличении. Химический состав, определенный спектральным методом, приведен в таблице. Установлено, что изменения химического состава стали X12MФ при электрошлаковом переплаве с вводом инокуляторов аналогичны изменениям при переплаве по стандартной заводской технологии. Химический состав полученного металла ЭШП соответствует требованиям ТУ ДСС 003, которые аналогичны зарубежным стандартам и предназначены для поставки продукции на экспорт.

В результате количественных металлографических исследований установлено, что наибольший эффект диспергирования литой структуры слитка диам. 300 мм достигнут при вводе в металлическую ванну



Рис. 5. Макроструктура и глубина металлической ванны слитка диам. 300 мм из стали X12MФ-Ш, выплавленного с введением инокуляторов в процессе ЭШП (пятый вариант плавки)



Рис. 6. Макроструктура с глубиной усадочной раковины 20 мм в головной части слитка диам. 300 мм из стали X12MФ-Ш, выплавленного с введением инокуляторов в процессе ЭШП (пятый вариант плавки)

55 % инокуляторов от сплавления расходуемого электрода (рис. 7). В частности, площадь ячеек эвтектических карбидов в среднем уменьшилась по сравнению со структурой серийного слитка: в центре на 37 %, в области половины радиуса — на 41 %, в краевой зоне — на 22 % (рис. 8). Воздействие инокуляторов на диспергирование литой структуры в большей степени проявляется в центре и на половине радиуса слитка. Уменьшение средней площади ячеек в зависимости от расхода инокуляторов в центре слитка составило от 24 до 37 %, на половине радиуса — от 2 до 41 %, в краевой зоне — 2 – 22 % (см. рис. 8).

Ввод инокуляторов в количестве 13 % оказывает наименьшее влияние на уменьшение ячеек карбидов. В центре слитка площадь ячеек уменьшилась на 24 %, на половине радиуса и в краевой зоне — на 2 %. Ввод инокуляторов в количестве 13 и 23 % менее эффективно воздействует на размеры сетки эвтектических карбидов по сравнению с вводом 55 % и уменьшает площадь ячеек в центре слитка на 29 – 33 %, в области половины радиуса — на 21 – 34 % и в краевой зоне —

Химический состав, мас. доля, %, стали X12MФ (расходуемых электродов, инокуляторов) и слитка стали X12MФ-Ш

| Объект | C | Mn | Si | P | S | Cr | Mo | V | Al |
|----------------------|------|------|------|---------|---------|-------|------|------|-------|
| Расходуемый электрод | 1,54 | 0,26 | 0,32 | 0,025 | 0,005 | 11,21 | 0,74 | 0,96 | 0,028 |
| Инокуляторы | 1,50 | 0,27 | 0,36 | 0,027 | 0,012 | 11,15 | 0,75 | 0,95 | 0,030 |
| Металл ЭШП | 1,57 | 0,26 | 0,28 | 0,025 | 0,003 | 11,17 | 0,74 | 0,93 | 0,013 |
| Требования ТУ | | | | | | | | | |
| ДСС 003 | 1,50 | 0,15 | 0,10 | ≤ 0,030 | ≤ 0,015 | 11,00 | 0,70 | 0,70 | — |
| (DIN EN ISO 4957) | 1,60 | 0,45 | 0,40 | ≤ 0,030 | ≤ 0,015 | 13,00 | 1,00 | 1,00 | — |

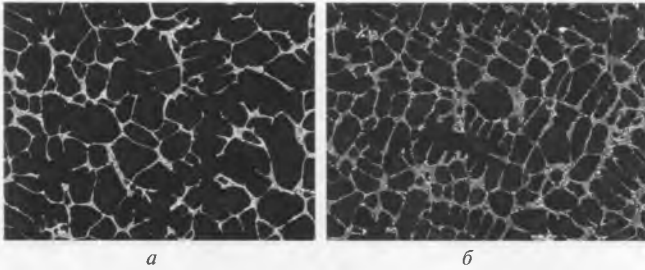


Рис. 7. Строение сетки эвтектических карбидов осевой части слитка диам. 300 мм из стали X12MФ-Ш: а — без введения инокуляторов; б — с введением 55 % инокуляторов; $\times 50$

на 13 – 18 %. Эффект от ЭШП с инокуляторами (уменьшение размера ячеек) в краевой зоне наименьший. Это объясняется соизмеримым диспергирующим действием существующей системы охлаждения на периферию слитка.

Таким образом, в результате проведенной работы для слитка диам. 300 мм стали X12MФ-Ш установлено, что введение в металлическую ванну при ЭШП изоморфных гранул-инокуляторов обеспечивает: измельчение ячеек эвтектической сетки на 41 % (максимально); уменьшение глубины металлической ванны в 1,5 раза; возможность снижения головной обрезки на 40 – 60 %; экономию электроэнергии от 8 до 16 %. Полученные результаты целесообразно использовать для решения важной практической задачи — разработки промышленной технологии электрошлакового переплава с вводом инокуляторов, обеспечивающей как улучшение структуры литого металла, так и повышение технико-экономических показателей плавки.

УДК 669.187.522

Совершенствование технологии футеровки индукционных печей ПАО "Днепроспецсталь" с применением механизированного способа набивки тигля

Представлены результаты освоения на ПАО "Днепроспецсталь" механизированной набивки футеровки тигля 4-т индукционной печи цельной конструкции импортной массой корундошпинельного состава. Показана возможность применения механизированного способа набивки футеровки 8-т индукционной печи сборной конструкции импортной массой периклазошпинельного состава, рассмотрены отличительные особенности службы футеровки, выполненной механизированным способом, в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: индукционная печь, футеровка тигля, смесь для набивки, ручная пневмотрамбовка, навесной пневмовибратор, уплотнение массы, спеченный слой, "буферный" слой.

На ПАО "Днепроспецсталь" в эксплуатации находятся две индукционные печи тигельного типа емкостью 4 и 8 т. Индукционная печь цельной конструкции емкостью 4 т (HFD-4) в сталеплавильном отделении (СПО) цеха порошковой металлургии (ЦПМ) специализируется на выплавке быстрорежущих, инструментальных и штамповых сталей порошкового ис-



Рис. 8. Изменение площади ячеек карбидной сетки в слитке диам. 300 мм из стали X12MФ-Ш в зависимости от количества инокуляторов, вводимых в жидкую металлическую ванну при ЭШП

Библиографический список

- Геллер Ю. А. Инструментальные стали. — М. : Металлургия, 1983. — 527 с.
- Патон Б. Е., Лакомский В. И., Григоренко Г. М., Медовар Л. Б. Специальная электрометаллургия: полвека в действии. Что дальше? // Современная электрометаллургия. 2003. № 4. С. 7.
- Баландин Г. Ф. Формирование кристаллического строения отливок. — М. : Машиностроение, 1965. — 254 с.
- Голубцов В. А., Лунев В. В. Модифицирование стали для отливок и слитков. — Челябинск – Запорожье : ЗНТУ, 2009. — 356 с.
- Медовар Б. И., Цыкуленко А. К., Диченко Д. М. Качество электрошлакового металла. — Киев : Наукова думка, 1990. — 312 с.
- Попов В. С., Билоник И. М., Бережный С. П., Капустян А. Е. Улучшение структуры и свойств литых инструментальных сталей при электрошлаковой выплавке с инокуляторами // Современная электрометаллургия. 2004. № 2. С. 8 – 9.
- Пат. 28530 Украина. Способ получения слитка электрошлаковым переплавом / В. С. Попов, И. М. Билоник, С. В. Давиденко и др. ; заявл. 20.08.2007, Бюл. № 20.

О. О. Гусаров¹, В. А. Булат¹,
В. П. Степанова¹, И. П. Зализняк¹,
С. И. Дятел¹, А. Ф. Тонкушин²,
Д. В. Кренделев²
¹ ПАО "Днепроспецсталь" (г. Запорожье, Украина), ² Компания "Калдерис-Украина" (г. Донецк, Украина)

полнения с последующим распылением расплава в среде аргона на микрочастицы. Индукционная печь емкостью 8 т ЭСПЦ-2 специализируется на выплавке сталей и сплавов с последующей разливкой металла в изложницы.

Футеровку индукционных печей до внедрения механизированного способа выполняли методом руч-

Таблица 1. Характеристика огнеупорных смесей для набивной футеровки 4-т индукционной печи HFD-4

| Показатель | Корундовая смесь марки СК | Корундошпинельная смесь марки | |
|-------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------|---------------------|
| | | “Rodarox mix 016” | “Calde mix SC84M16” |
| Химический состав, %: | | | |
| Al ₂ O ₃ , не менее | 98 | 84 | 84 |
| SiO ₂ , не более | 0,5 | 0,2 | Н. д. |
| Fe ₂ O ₃ , не более | 0,5 | 0,1 | Н. д. |
| MgO | — | 14 | 14 |
| Зерновой состав, %, фракции мм: | | | |
| 4 – 2,5 | — | 24,8 | 16,2 |
| 2,5 – 1,6 | 10 – 20 | 20,7 | 20,8 |
| 1,6 – 1,0 | 8 – 16 | 10,7 | 10,3 |
| 1 – 0,5 | 20 – 30 | 5,3 | 7,7 |
| 0,5 – 0,2 | — | 10,0 | 11,5 |
| 0,2 – 0,1 | 20 – 30 | 3,6 | 2,7 |
| 0,1 – 0,063 | 5 | 2,2 | 1,9 |
| 0,063 – 0,05 | — | 1,2 | 0,3 |
| < 0,063 | 12 – 17 | — | — |
| < 0,05 | — | 21,5 | 28,4 |

ной набивки (пневмотрамбовкой): в СПО ЦПМ с использованием сухой корундовой массы марки СК производства ОАО “УкрНИИО им. А. С. Бережного”; в ЭСПЦ-2 — из смеси порошков плавленного периклаза марки ПППЛ-95 фракций 3; 2; 1; 0,08 мм (производства ОАО “Комбинат Магнезит”, Россия) и электрокорунда белого фракции минус 1000 мкм (производства Бокситогорского алюминиевого комбината, Россия).

Огнеупорная футеровка индукционных печей должна обладать:

- стойкостью к статическим термическим напряжениям и термоударам (при сливе металла из печи);
- высокой механической прочностью стенок тигля;
- высокой термостойкостью и низкой трещиностойкостью (поскольку футеровка выходит из строя по причине растрескивания и проникновения металла через трещины к индуктору печи, вызывая короткое замыкание, “пробой” витков индуктора и аварийный выход печи из эксплуатации).

Набивка футеровки тигля является довольно продолжительной и трудоемкой операцией, требующей определенных навыков персонала. Кроме того, послойное уплотнение массы с одинаковой плотностью набивки в зависимости от исходного состояния массы приводит к повышенному спеканию и “прокозлению” футеровки с дальнейшим выводом печи из эксплуатации. Снижению стойкости футеровки способствует и ужесточение сортамента выплавляемых сталей и сплавов, требующих более изнаноустойчивой к расплаву огнеупорной футеровки.

Для исключения указанных недостатков была разработана технология механизированной набивки тигля индукционной печи HFD-4 СПО ЦПМ импортной массой корундошпинельного состава марки “Rodarox mix 016” специально подобранного зернового состава с применением импортного навесного пневмовибра-

тора. Характеристика огнеупорных смесей для набивки футеровки индукционных печей ПАО “Днепропещцаль” приведена в табл. 1.

Импортные огнеупорные смеси для набивки отличаются от набивных смесей действующего состава в первую очередь специально подобранным зерновым составом для механизированной набивки. Химический состав предлагаемых набивных масс определяли с учетом изменения сортамента выплавляемых сталей и сплавов.

Корундошпинельная смесь “Rodarox mix 016”, содержащая ~ 14 % MgO, в отличие от действующей чисто корундовой смеси марки СК (Al₂O₃ = 99 %), обеспечивает более высокую стойкость футеровки за счет образующейся в процессе эксплуатации тигля более устойчивой к расплаву шпинельной составляющей.

Футеровку стен тигля выполняли механизированным способом, набивку подины печи и “воротниковой” зоны со сливным носком — вручную (пневмотрамбовкой).

Принцип работы механизированного пневмовибратора, навешиваемого на крюк крана и опускаемого в подготовленный к набивке тигель (рис. 1, 2), основан на ударном эффекте. Специальные бойки, тангенциально расположенные и закрепленные под круглой площадкой вибратора, производят 2200 ударов в минуту, а сила удара составляет 1830 Н (~ 187 кг), что вполне достаточно для обеспечения необходимой плотности набивки.

Механизированную набивку футеровки стен тигля выполняли следующим образом (рис. 3). После набивки подины в тигель устанавливали, центрировали (для обеспечения равномерной по окружности толщины стенок футеровки) и жестко фиксировали (для исключения смещения во время набивки) металлический шаблон, внутри которого мелом размечали метки словес, начиная снизу, через каждые 100 мм. После чего проводили наладку навесного и закрепленного на крюке подъемного крана механического пневмовибратора; засыпку равномерными порциями и слоями набивной массы в зазор между изоляцией индуктора и металлическим шаблоном на всю высоту тигля (до самого верха печи), при этом каждый слой после засыпки разравнивали и уплотняли ручной трамбовкой — лопаткой для дополнительного осаживания массы.

Для получения необходимой плотности набивной футеровки во избежание сегрегации массы длительность работы пневмовибратора в диапазоне одного слоя высотой 100 мм составляла от 1 до 1,20 мин. В дальнейшем, при наработке достаточного опыта механизированной набивки и эксплуатации футеровки индукционной печи, продолжительность послойного уплотнения в стенах и откосах увеличили до 1,5 и 2,5 мин соответственно.

Во время набивки оседание массы визуально наблюдалось уже при вибрации третьего от подины слоя. Подсыпку смеси и ручное уплотнение слоев проводили по мере оседания массы непрерывно в течение всего времени набивки тигля.



Рис. 1. Общий вид индукционной печи HFD-4 СПО ЦПМ с закрепленным металлическим шаблоном перед набивкой футеровки



Рис. 2. Навесной пневмовибратор для механизированной набивки футеровки тигля индукционной печи

Длительность набивки футеровки тигля индукционной печи HFD-4 до “воротника”, включая ручную набивку подины, настройку и регулировку навесного пневмовибратора, составила около 5 ч, в том числе длительность механизированной набивки стен — ≥ 1 ч. При этом следует отметить, что длительность набивки тигля до “воротника” ручным способом составляет > 16 ч, т. е. время изготовления футеровки сокращается в 3 раза, что позволяет оптимизировать организацию работ в сталеплавильном отделении цеха.

Общий расход корундошпинельной смеси на футеровку индукционной печи был аналогичен расходу корундовой массы, что косвенно свидетельствует о достаточной плотности набивки футеровки тигля.

Особенностью механизированного способа набивки футеровки тигля индукционной печи является уплотнение футеровки по осевому направлению с максимальной степенью уплотнения рабочей зоны (у шаблона) и минимальной в периферийной зоне (у индуктора) в отличие от ручной набивки, при которой уплотнение футеровки осуществляется послойно по всей окружности тигля с одинаковой плотностью набивки.

По визуальной оценке замеров плотности набивки рядовых футеровок заглабление металлического штыря в верхний набивной слой футеровки стен составляет от 22 до 25 мм во всех точках замеров, а в футеровках, выполненных механизированным спосо-



Рис. 3. Механизированная набивка футеровки тигля индукционной печи HFD-4 СПО ЦПМ

бом, заглабление штыря составляло в рабочей зоне (у шаблона) от 20 до 25 мм, в средней зоне — до 35 мм, в периферийной зоне (у индуктора) — от 60 до 85 мм.

Сушку футеровки и дальнейшую эксплуатацию индукционной печи HFD-4 проводили в действующем режиме без ограничений по сортаменту и длительности технологического цикла.

Сортамент ЦПМ ПАО “Днепроспецсталь”, как отмечалось выше, представлен порошковыми быстрорежущими сталями (кобальтовыми в том числе) с температурой металла в печи перед сливом и распылением 1580 — 1600 °С, инструментальными и штамповыми сталями с температурой металла 1600 — 1630 °С или 1650 — 1670 °С у сталей отдельных марок. Длительность плавки составляет от 5,2 до 16 ч, средняя по отдельным кампаниям — от 6,5 до 8,2 ч; межплавочный простой — от 40 мин до 18 сут (максимальный — в период отсутствия заказов на выплавку), в среднем по отдельным кампаниям — от 2,5 до 8,5 ч.

Средняя стойкость футеровки в зависимости от сортамента и условий эксплуатации тигля после внедрения механизированного способа набивки составляла от 75 до 90 плавков; средняя стойкость рядовой футеровки — от 60 до 66 плавков.

В ходе освоения механизированной набивки футеровки тигля индукционной печи HFD-4 было отмечено, что характер уплотнения набивной массы определяет особенности службы огнеупорной футеровки в процессе ее эксплуатации. При ломке отработанной футеровки опытных кампаний отмечалось скалывание спеченного слоя отдельными кусками небольших размеров, в то время как на рядовой футеровке спеченный слой был в виде монолитных кусков либо блоков больших размеров. Отработанная футеровка разделена на зоны с четким разграничением границ и глубины взаимодействия расплава с футеровкой (рис. 4 — 6).

По всей высоте тигля отмечалось наличие рыхлого буферного слоя от 20 до 40 мм. Послойного “прокозления” стен тигля, характерного для рядовых футеровок, кроме зоны стыка подины и стен на отдельных кампаниях, не отмечалось. Однако следует отметить, что при высоких температурных нагрузках на футеровку тигля, вследствие значительной длительности отдельных плавков либо отклонений в системе охлажде-

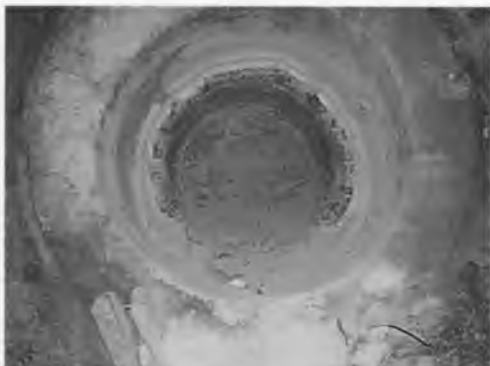


Рис. 4. Отработанная футеровка тигля, выполненного механизированным способом

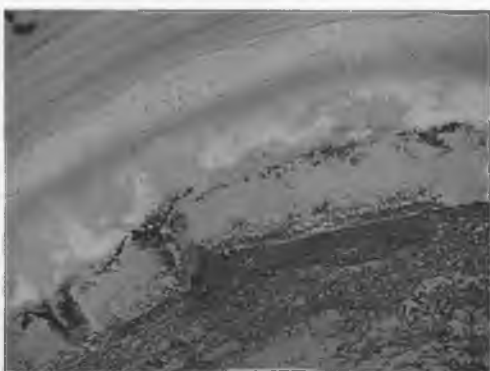


Рис. 5. Фрагмент отработанной футеровки тигля, выполненного механизированным способом

ния витков индуктора, механизированная набивка не предотвращает спекание футеровки в монолит.

Применение механизированного способа набивки тигля 4-т индукционной печи НFD-4 в ЦПМ позволило:

- обеспечить надежность эксплуатации печи;
- увеличить стойкость футеровки от 25 до 36 %;
- снизить удельный расход набивных смесей на 26 % (с 10,3 до 7,6 кг/т).

На основании положительного опыта СПО ЦПМ по механизированной набивке футеровки тигля индукционной печи и с учетом особенностей конструкции 8-т индукционной печи ЭСПЦ-2 для выплавки сталей и сплавов и действующего состава набивной смеси были проведены также две опытные кампании выплавки с набивкой тигля смесью магнезиально-шпинелидного состава марки “Calde mix MS 75SV” механизированным способом. В табл. 2 приведена характеристика огнеупорных смесей для футеровки индукционной печи. Как видно из таблицы, химический состав импортной смеси отличается от действующего состава более высоким содержанием MgO; зерновой состав специально подобран для выполнения футеровки механизированным способом.

Технологические приемы и правила механизированной набивки футеровки остались без изменений; корректировка процесса заключалась в настройке пневмовибратора под геометрические параметры металлического шаблона для набивки и длительность набивки.



Рис. 6. Фрагменты отработанной футеровки тигля, выполненного ручным способом набивки

Отличительной особенностью индукционной печи ЭСПЦ-2 является сборная конструкция, выполняемая на каждой футеровке и состоящая из жестко закрепленного индуктора (рис. 7); огнеупорной кольцевой кладки, выполняемой на планшайбе индуктора для формирования шлаковой зоны тигля; площадки из асбоцементных плит, жестко и без качаний закрепляемых со стороны экрана печи в специальных кронштейнах и упирающихся другой стороной в огнеупорную кольцевую кладку, обеспечивая дополнительную жесткость всей собранной конструкции.

Учитывая особенности конструкции индукционной печи, механизированную набивку стен тигля проводили в два этапа. После набивки подины, установки фиксации металлического шаблона и настройки навесного пневмовибратора зазор между изоляцией витков индуктора и металлическим шаблоном до уровня планшайбы индуктора засыпали импортной смесью магнезиально-шпинелидного состава марки “Calde mix MS 75SV”, после чего футеровку уплотняли навесным пневмовибратором, перемещая его внутри шаблона снизу вверх через каждые

Таблица 2. Характеристика огнеупорных смесей для набивной футеровки 8-т индукционной печи ЭСПЦ-2

| Показатель | Смесь | |
|----------------------------------|-----------------------|---------------------|
| | действующего состава* | Calde mix MS 75SV** |
| Химический состав, %: | | |
| MgO | 61,6 | 76,0/77,0 |
| Al ₂ O ₃ | 35,0 | 21,2/20,5 |
| CaO | 1,0 | 1,2/0,7 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,7 | 0,42/0,33 |
| SiO ₂ | 0,5 | 1,1/0,8 |
| Σ | 99,92 | 99,92/99,33 |
| Зерновой состав, %, фракции, мм: | | |
| 3,15 | — | 5,5/— |
| 2,5 | 20,1/23,5 | 7,5/14,2 |
| 1,6 | 20,0/17,0 | 6,2/11,5 |
| 1,0 | 14,0/12,9 | 8,4/13,9 |
| 0,5 | 4,4/— | 22,9/— |
| 0,2 | 2,8/5,9 | 11,5/23,5 |
| < 0,2 | 38,7/40,7 | 38,0/36,9 |
| 0,1 | 1,5/— | 6,8/— |
| 0,063 | 5,3/— | 24,9/— |
| < 0,063 | 31,9/— | 6,3/— |

* Смесь — порошок плавленного периклаза марки ПППЛ-95, об. %, фракции: 3 мм — 30 — 40; 2 мм — 20 — 25; 1 мм — 5 — 10; 0,08 мм — 5 — 10. Электрокорунд белый минус 1000 мкм — 25 — 35.

** В числителе — смесь 1-ой поставки; в знаменателе — 2-ой поставки.



Рис. 7. Общий вид индукционной печи ЭСПЦ-2 с закрепленным индуктором



Рис. 8. Вид футеровки тигля после удаления буферного слоя

100 мм. Длительность уплотнения каждого слоя составляла от 1,5 до 2 мин.

В процессе уплотнения по мере проседания массы смесь досыпали. По окончании первого этапа набивки были сделаны замеры плотности набивки. Заглубление металлического штыря в набивной слой составляло: у шаблона — от 25 до 70 мм; в средней зоне — от 70 до 100 мм; у индуктора — от 120 до 180 мм. Набивку возобновляли после укладки асбоцементных плит, установки и закрепления сливного носка, выполнения на планшайбе индуктора огнеупорного кольца. При засыпке верхней зоны тигля и основания сливного носка в набивную смесь добавляли 2 мас. % борной кислоты для спекания футеровки зоны тигля выше планшайбы индуктора.

Перед засыпкой в тигель смесь предварительно перемешивали в смесительном барабане с целью равномерного распределения борной кислоты в набивной массе. Повторное уплотнение футеровки тигля проводили по всей высоте шаблона, начиная с нижней зоны до верхней, с выдержкой на каждом слое в течение 1 мин. Замеры плотности набивки после повторного уплотнения футеровки показали достаточную плотность у шаблона — от 10 до 15 мм, в средней зоне — от 35 до 50 мм, у индуктора — от 60 до 80 мм.

Эксплуатацию печи проводили в действующем режиме без дополнительных ограничений. Производ-

ственные задания были выполнены в полном объеме, эксплуатацию тигля прекращали после выплавки всего запланированного объема заказов. При этом стойкость футеровки составила 36 плавов на первой кампании и 40 плавов на второй. Топография износа футеровки опытных тиглей показала меньшую спекаемость футеровки, отсутствие “прокозлений”, характерных для рядовых футеровок, и наличие достаточного ресурса для увеличения стойкости до 50 плавов (рис. 8).

Применение механизированной набивки тигля 8-т индукционной печи ЭСПЦ-2 позволяет:

- обеспечить надежную эксплуатацию печи;
- повысить стойкость футеровки до 40 %;
- увеличить производственную загрузку печи;
- снизить удельный расход набивной смеси в 1,5 раза;
- упростить организацию работ при подготовке индукционной печи к выплавке высококачественных сталей и сплавов сортамента ПАО “Днепроспецсталь”.

Библиографический список

1. Юрков Л. А. Огнеупоры и углеродные катодные материалы для алюминиевой промышленности // Новые огнеупоры. 2007. № 5. С. 21.
2. Сасса В. С. Футеровка индукционных электропечей. — М.: Металлургия, 1989. — 232 с.

Развитие производства проката и поковок инструментальных порошковых сталей в условиях ПАО "Днепроспецсталь"

А. И. Панченко, канд. техн. наук
А. Н. Тумко, В. В. Мильчев,
канд. техн. наук А. С. Сальников,
Б. А. Левин
ПАО "Днепроспецсталь"
(г. Запорожье, Украина)

На ПАО "Днепроспецсталь" освоены: производство проката и поковок из порошковых быстрорежущих и штамповых сталей более 60 марок; прокатка прутков диам. до 95 мм; производство круглых поковок диам. до 410 мм; для отдельных штамповых сталей — круглых поковок диам. до 560 мм, квадратных со стороной квадрата до 350 мм, прямоугольных поковок с шириной поперечного сечения до 600 мм со строгой поверхностью; шайб диам. до 750 мм с обточенной поверхностью. Благодаря высокой пластичности порошковых сталей и реконструкции блюминга с увеличением диаметра валков с 950 до 1050 мм и мощности двигателей с 2500 до 3500 кВт увеличены единичные обжатия при прокатке прессовок на обжимном стане и уменьшено число проходов на гладкой части бочки вала с 12 до 6. За счет этого уменьшилась торцевая обрезь на 3 — 4 %.

Ключевые слова: карбидная неоднородность, уков, ковка, прокатка, порошок, прессовка, пластичность, температура деформации, быстрорежущие стали, штамповые стали.

В связи с развитием машиностроения, особенно специальных отраслей — авиационной, ракетно-космической, энергетической, внедрением обрабатывающих центров и автоматических многофункциональных металлообрабатывающих линий, предъявляются повышенные требования к качеству режущего, штампового инструмента, и в первую очередь к его износостойкости. Поэтому развитие производства новых, наиболее прогрессивных инструментальных сталей, обеспечивающих максимально возможную стойкость инструментов разного назначения, представляет собой актуальную задачу.

Основными легирующими элементами быстрорежущих и штамповых сталей являются хром, вольфрам, молибден, ванадий. Кроме них, некоторые стали легируют кобальтом. В зависимости от назначения штамповые стали легируют кремнием, марганцем. Важным компонентом этих сталей является углерод, содержание которого изменяется от 0,4 до 2,7 %.

Высокое содержание карбидообразующих элементов — вольфрама, молибдена и ванадия в инструментальных сталях обуславливает наличие грубой карбидной ликвации, которая влияет отрицательно на технологические и эксплуатационные характеристики инструмента из этой стали. Уменьшение карбидной ликвации достигается комплексом мероприятий при металлургическом переделе. Радикальным способом уменьшения карбидной неоднородности сталей ледебургитного класса является порошковая металлургия.

На рис. 1 приведена микроструктура быстрорежущей стали Р6М5Ф3 традиционного (а) и порошкового исполнения (б), $\times 500$

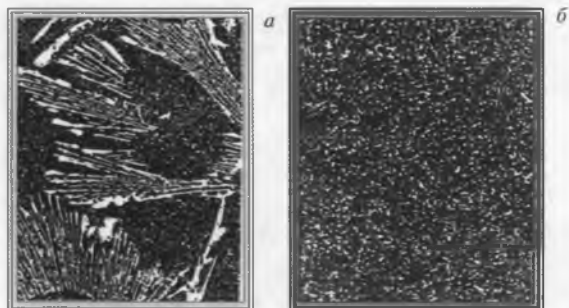


Рис. 1. Микроструктура быстрорежущей стали Р6М5Ф3 традиционного (а) и порошкового исполнения (б), $\times 500$

шей стали Р6М5Ф3 традиционного и порошкового исполнений. Как видно из рисунка, наличие в быстрорежущей стали высокого содержания карбидообразующих элементов и углерода приводит к грубым ликвационным явлениям в литом металле, что крайне неблагоприятно для стойкости инструмента. Дисперсность микроструктуры порошковых частиц обусловлена высокими скоростями охлаждения капель жидкого металла в интервале температур кристаллизации $1 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^3$ °С/с). Микроструктура частиц порошка не имеет дефектов, присущих структуре слитка. В деформированном порошковом металле величина карбидов ≤ 2 мкм, карбидная неоднородность не более балла 1 для всех профилей по ГОСТ 19265 и ГОСТ 5950. Очевидное различие структур (см. рис. 1) обуславливает ряд значительных преимуществ порошковых быстрорежущих и штамповых сталей. Испытания технологических и эксплуатационных свойств инструмента из порошковых быстрорежущих сталей показали, что применение порошковой быстрорежущей стали по сравнению с аналогичной сталью, разлитой в слитки, обеспечивает повышение стойкости в 1,5 — 3 раза при чистовой и получистовой обработке как конструкционных, так и специальных сталей и сплавов [1].

Цель данной работы — расширение профильного и марочного ассортиментов порошковых сталей, выпускаемых ПАО "Днепроспецсталь", и повышение эф-

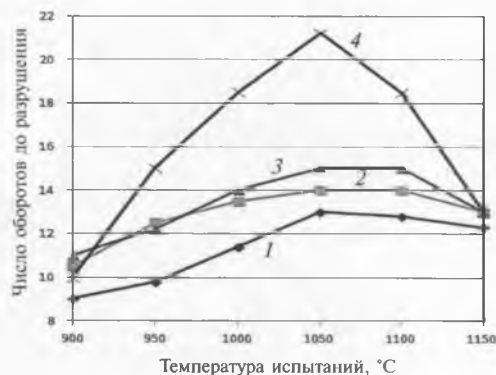


Рис. 2. Число скручиваний до разрушений порошковых сталей Р6М7Ф6К10-МП (1), Х8М2ФС-МП (2), 6Х5ГМ2ФС-МП (3) и аустенитной коррозионностойкой стали 10Х13Г12БС2Н2Д2 (ДИ59) (4) при испытании на горячее кручение со скоростью 60 об/мин

Химический состав, мас. доля элементов, %, некоторых порошковых сталей

| Сталь | C | Si | Mn | Cr | V | Mo | W | Co | Ni | Al | O | N | S | P |
|---------------|------|------|------|-------|-------|------|-------|-------|----------|-------|-------|------|-------|-------|
| | | | | | | | | | не более | | | | | |
| P6M5K5-МП | 0,88 | ≤ | ≤ | 3,80 | 1,70 | 4,70 | 6,00 | 4,50 | 0,40 | 0,035 | 0,015 | 0,08 | 0,030 | 0,030 |
| | 0,95 | 0,45 | 0,40 | 4,50 | 2,00 | 5,20 | 6,70 | 5,00 | | | | | | |
| P12MФ5K5-МП | 1,50 | 0,15 | 0,15 | 3,75 | 4,50 | ≤ | 11,75 | 4,75 | 0,40 | 0,035 | 0,015 | 0,08 | 0,030 | 0,030 |
| | 1,60 | 0,40 | 0,40 | 5,00 | 5,25 | 1,00 | 13,00 | 5,25 | | | | | | |
| P6M7Ф6K10-МП | 2,25 | ≤ | ≤ | 3,70 | 6,00 | 6,50 | 6,00 | 9,80 | 0,40 | 0,035 | 0,015 | 0,08 | 0,030 | 0,030 |
| | 2,40 | 0,45 | 0,40 | 4,50 | 6,70 | 7,30 | 6,80 | 11,00 | | | | | | |
| P4M3Ф8-МП | 2,35 | ≤ | ≤ | 4,00 | 7,60 | 2,90 | 4,00 | ≤ | 0,40 | 0,035 | 0,015 | 0,15 | 0,030 | 0,030 |
| | 2,55 | 0,45 | 0,40 | 4,40 | 8,20 | 3,30 | 4,40 | 0,50 | | | | | | |
| X17M2Ф3K2-МП | 2,50 | 0,30 | 0,30 | 16,50 | 3,10 | 1,70 | ≤ | 1,70 | 0,40 | 0,035 | 0,020 | 0,15 | 0,030 | 0,030 |
| | 2,70 | 0,60 | 0,60 | 17,50 | 3,50 | 2,00 | 0,30 | 2,40 | | | | | | |
| X12MФ4-МП | 2,10 | 0,15 | 0,25 | 12,50 | 3,70 | 0,80 | ≤ | ≤ | 0,40 | 0,035 | 0,020 | 0,15 | 0,020 | 0,030 |
| | 2,30 | 0,30 | 0,40 | 13,50 | 4,00 | 1,10 | 0,20 | 0,50 | | | | | | |
| 150X8M2Ф4C-МП | 1,45 | 0,80 | 0,30 | 7,50 | 3,80 | 1,40 | ≤ | ≤ | 0,40 | 0,060 | 0,020 | 0,15 | 0,030 | 0,030 |
| | 1,55 | 1,10 | 0,50 | 8,50 | 4,20 | 1,60 | 0,50 | 0,50 | | | | | | |
| 6X5ГМ2ФC-МП | 0,58 | 0,90 | 0,90 | 4,80 | 0,45 | 2,10 | ≤ | ≤ | 0,40 | 0,035 | 0,020 | 0,15 | 0,030 | 0,030 |
| | 0,65 | 1,10 | 1,10 | 5,20 | 0,60 | 2,30 | 0,50 | 0,30 | | | | | | |
| 6X4MФ-МП | 0,58 | 0,20 | 0,70 | 4,30 | 0,15 | 0,40 | ≤ | ≤ | 0,40 | 0,035 | 0,020 | 0,15 | 0,030 | 0,030 |
| | 0,65 | 0,50 | 0,90 | 4,70 | 0,30 | 0,60 | 0,30 | 0,30 | | | | | | |
| 9X5MФ3C-МП | 0,83 | 0,85 | 0,20 | 5,00 | 2,50 | 1,25 | ≤ | ≤ | 0,50 | 0,035 | 0,020 | 0,15 | 0,025 | 0,030 |
| | 0,88 | 1,10 | 0,40 | 5,50 | 2,90 | 1,45 | 0,25 | 0,50 | | | | | | |
| X5MФ10C-МП | 2,35 | 0,75 | 0,35 | 4,75 | 9,25 | 1,10 | ≤ | ≤ | 0,40 | 0,035 | 0,020 | 0,15 | 0,050 | 0,030 |
| | 2,55 | 1,10 | 0,60 | 5,50 | 10,25 | 1,45 | 0,50 | 0,50 | | | | | 0,090 | |

Примечание. Массовая доля титана — ≤ 0,03 %, меди — ≤ 0,30 %.

фektivности их прокатки на обжимном и сортовых станах. Порошковые стали обладают высокой пластичностью в широком температурном интервале и могут подвергаться деформации как ковкой, так и прокаткой и волочением благодаря равномерному распределению карбидов по объему заготовки. На рис. 2 приведены зависимости числа скручиваний до разрушения при испытании на кручение по стандартной методике (скорость вращения 60 об/мин) от температуры испытаний порошковых сталей, а также стали 10X13Г12БС2Н2Д2 (ДИ59), полученной традиционным способом и подвергаемой прокатке на обжимно-заготовочном стане 1050/950. Результаты исследования пластичности и сопротивления деформации порошковых сталей [2, 3] явились обоснованием прокатки этих сталей всего марочного сортамента как на обжимно-заготовочном стане 1050/950, так и на сортовых станах 550, 325 и 280.

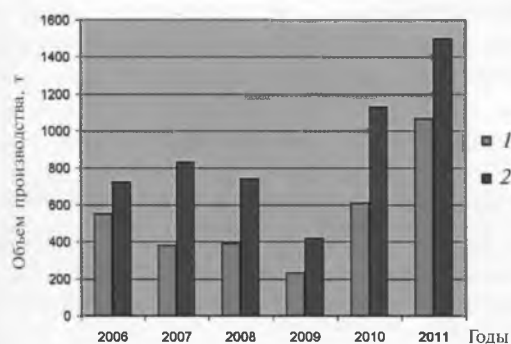


Рис. 3. Динамика объема производства порошковых сталей ПАО «Днепроспецсталь»: 1 — быстрорежущие порошковые стали; 2 — общее производство порошковых сталей

Основную часть продукции цеха порошковой металлургии составляют быстрорежущие стали, широко применяемые в машиностроении при обработке специальных сталей и сплавов. Динамика объемов производства порошковых сталей представлена на рис. 3, для сравнения показан объем производства быстрорежущих сталей, полученных методом порошковой металлургии. Около 30 — 50 % составляют кобальтсодержащие быстрорежущие стали.

Технологическая схема производства порошковых сталей предусматривает выплавку стали в индукционной печи, распыление расплава азотом высокой чистоты, заполнение порошком металлических капсул, вакуумирование, заполнение капсул с порошком азотом, герметизацию, холодное гидростатическое и горячее газостатическое прессование, деформацию, отжиг, адьюстажную обработку (рис. 4) [2]. По действующей технологии прессовки diam. 450 мм и массой 1900 кг подвергают свободной ковке на прессах усилием 60 и 32 МН, ковке на радиально-ковочной машине РКМ-1000 и прокатке на обжимно-заготовочном стане 1050/950.

До 2000 г. ПАО «Днепроспецсталь» специализировалось в основном на выпуске профилей размерами до 150 мм по ГОСТ 28393 — 89 из шести порошковых быстрорежущих сталей. Увеличение объемов потребления порошковых сталей и пуск новых мощностей по их производству в мире определил необходимость оперативного освоения производства новых порошковых быстрорежущих и штамповых сталей с высокими служебными характеристиками.

В настоящее время на ПАО «Днепроспецсталь» освоено производство более 60 порошковых сталей.



Рис. 4. Технологическая схема производства инструментальных сталей методом порошковой металлургии

Химический состав некоторых из них приведен в таблице. В отдельных сталях содержится, %: ≤ 18 W, ≤ 10 Mo, ≤ 11 V, ≤ 10 Co. Все порошковые инструментальные стали содержат от 3,5 до 20 % Cr в зависимости от назначения и относительно высокое количество азота (до 0,08 %).

В последнее время также значительно расширен профильный сортамент металлопродукции порошковых сталей за счет увеличения размеров поперечного сечения. Освоены: прокатка прутков диам. ≤ 95 мм, производство круглых поковок диам. ≤ 410 мм; для отдельных штамповых сталей — круглых поковок диам. ≤ 560 мм, квадратных поковок со стороной квадрата ≤ 350 мм, прямоугольных поковок с шириной поперечного сечения ≤ 600 мм со строганой поверхностью; шайб диам. ≤ 750 мм с обточенной поверхностью. В связи с высоким качеством порошковой стали после горячего газостатического прессования для обеспечения необходимой структуры и свойств не требуется больших степеней деформации при ковке и прокатке [2]. Эта особенность порошковой стали позволила в значительной степени расширить сортамент за счет увеличения размеров поковок.

С целью уменьшения расхода металла в кусковые отходы и стружку в значительной степени усовершенствована технология прокатки порошковых сталей [3]. Благодаря высокой пластичности порошковых сталей (см. рис. 2) и реконструкции блюминга с увеличением диаметра валков с 950 до 1050 мм и мощности двигателей с 2500 до 3500 кВт увеличили единичные обжатия при прокатке прессовок на обжимном стане и уменьшили число проходов на гладкой части бочки валка с 12 до 6. За счет этого на 3 — 4 % уменьшилась торцевая обрезь. Для повышения эффективности производства и улучшения качества порошковой стали уменьшили продолжительность нагрева прессовок при 1100 °С перед прокаткой на обжимном стане с 6 — 8 до 2 — 3 ч.

Также освоено производство сортовых прутков на станах 325 и 550 из заготовки с неудаленной обечайкой, что позволило уменьшить расход металла в абразивную пыль и окалину на 10 %. Актуальной задачей при разработке технологии прокатки прессовок на сортовые прутки является сохранение равномерного распределения обечайки на поверхности прутков пос-



Рис. 5. Распределение обечайки на поверхности катаной заготовки со стороны квадрата 126 мм из стали P9M4K8-MP

ле деформации, так как при неравномерном распределении необходимо увеличить припуски под обдирку. Различная толщина обечайки по периметру заготовки (рис. 5) объясняется неравномерностью деформации при прокатке на гладкой бочке и в калибрах на блюминге и заготовочной клети, а также различием реологических свойств порошковых инструментальных и быстрорежущих сталей и самой обечайки, которую изготавливают из углеродистой стали 08пс.

Установлено значительное влияние калибровки и режимов деформации на распределение обечайки по периметру профиля проката. Необходимо отметить, что при удалении части обечайки на прессовке (перед прокаткой) неравномерность распределения обечайки по периметру профиля проката сохраняется. При удалении половины толщины обечайки в прессовке ее толщина на углах катаной заготовки составляет 0,4 — 0,6, на гранях — 1,0 — 1,5 мм. Из-за неравномерности деформации в квадратных, ромбических, овальных и круглых калибрах увеличение суммарной степени деформации при прокатке увеличивает неравномерность распределения обечайки по поверхности раската. Прокатка заготовок с неудаленной обечайкой на стане 280 с общим коэффициентом вытяжки от 30 до 200 требует дополнительного съема металла при обточке на 100 кг/т по сравнению с прокаткой на стане 325 и 550 с коэффициентами вытяжки от 2,5 до 25. Поэтому прутки диам. 8 — 22 мм производят на стане 280 из заготовки, зачищенной всплошную до полного удаления обечайки, за исключением сталей P6M7Ф6K10-MP, P12MФ5K5-MP, X18MФ6-MP, абразивная зачистка которых весьма нетехнологична.

По себестоимости и качеству порошковые стали производства ПАО «Днепроспецсталь» конкурентоспособны и экспортируются в Европу, Азию и Северную Америку.

Библиографический список

1. Гиммельфарб А. И., Акименко В. Б., Гипш Я. Л. и др. Организация промышленного производства быстрорежущей стали методом порошковой металлургии // Сталь. 1981. № 1. С. 79 — 83.
2. Кийко Г. В., Ревякин С. В., Тумко А. Н., Яценко А. С. Производство порошковых сталей на заводе «Днепроспецсталь» // Сталь. 1992. № 9. С. 86 — 89.
3. Тумко А. Н., Козлов О. Е., Ревякин С. В. Прокатка слитков и прессовок ледебуритных сталей на обжимно-заготовочном стане // Черная металлургия. Бюл. научно-технической и экономической информации. 2003. № 8 (1244). С. 33 — 34.

Теоретическое исследование деформации приконтактных слоев металла при прокатке в калибрах простой формы

В. Н. Данченко¹, А. А. Самсоненко¹,
А. О. Ярошенко², А. Н. Тумко²

¹ Национальная металлургическая академия Украины

(г. Днепропетровск, Украина),

² ПАО “Днепропеталь” им. А. Н. Кузьмина” (г. Запорожье, Украина)

Предложена методика исследования трансформации поверхностных дефектов на основании анализа деформации приконтактного слоя металла с использованием трехмерной математической модели расчета параметров пластической деформации при сортовой прокатке. Теоретически определено комплексное влияние коэффициента вытяжки, параметров калибров и заготовки на деформацию приконтактного слоя металла при прокатке в ромбических, квадратных, овальных и круглых калибрах. Сравнительный анализ результатов исследований показал, что деформация поверхностного слоя в калибрах системы “овал – круг” менее равномерна, чем в системе “ромб – квадрат”, при этом происходит более интенсивное изменение глубины поверхностного слоя, заporоченного поверхностными дефектами.

Ключевые слова: прокатка, калибр, поверхностные дефекты, система калибров ромб – квадрат, овал – круг, коэффициент вытяжки, план эксперимента.

Важнейшим показателем современного уровня производства на предприятиях прокатного комплекса является качество поверхности выпускаемой продукции. Отсутствие поверхностных дефектов особенно важно в тех случаях, когда горячекатаные изделия в дальнейшем подвергаются деформации (ковке, прессованию, волочению). Поскольку прокат без поверхностных дефектов, как правило, получить невозможно, поверхностный слой металла обычно механически удаляют в ходе отделки. Это приводит к снижению производительности стана и к повышению расходного коэффициента металла. Величина потерь металла определяется максимальной глубиной залегания дефектов [1, 2].

Дефекты поверхности проката из нелегированных и легированных сталей и сплавов [3] подразделяются на три основные группы: 1) обусловленные качеством слитка и литой заготовки (раскатанное загрязнение, волосовина, раскатанный пузырь, раскатанная трещина и др.); 2) образовавшиеся в процессе деформации (трещина напряжения, морщины, закат, риска и др.); 3) образовавшиеся при отделочных операциях (остатки окалины, царапина, вмятины и др.). В данной работе рассмотрены дефекты первой и второй групп, которые представляют собой узкие прямые трещины по длине раската — раскатанный пузырь, морщины, риска, закат и трещина напряжения.

Выкатываемость поверхностных дефектов при прокатке в калибрах исследовали многие авторы. В работе [4] приведена качественная зависимость выкатываемости дефектов от их расположения в калибре: глубина залегания дефектов, расположенных ближе к вершине калибра, уменьшается, а расположенных ближе к разъемам — увеличивается. Сделаны качественные выводы о влиянии напряженного состояния в области дефекта на выкатываемость: наличие схемы всестороннего сжатия способствует увеличению выкатываемости дефектов. Экспериментальные исследования [5] показали значительное уменьшение глубины залегания поверхностных дефектов в четырехвалковом калибре.

Однако в указанных работах недостаточно данных о поведении и выкатываемости дефектов по периметру калибра. Кроме того, следует отметить трудоемкость и модельный характер многих эксперименталь-

ных исследований по выкатываемости дефектов. В связи с этим возрастает актуальность применения современных численных методов для анализа трансформации дефектов. Среди существующих теоретических работ в этом направлении следует отметить решения с помощью МКЭ задачи выкатываемости дефектов листового проката [6]. Однако полученное решение соответствует двумерной деформации и не может быть использовано в данном случае. Кроме того, для определения величины обточки изделия на практике более важное значение имеют не абсолютные размеры дефекта, а глубина его залегания, которая определяется углом поворота дефекта.

В данной работе предлагается на основании анализа изменения глубины приконтактного слоя металла определять трансформацию поверхностных дефектов, а именно глубину их залегания. В качестве основных факторов, влияющих на деформацию поверхностного слоя при прокатке в калибрах простой формы рассматриваются геометрия калибра, обжатия и начальная глубина слоя.

Конечно-элементные программы расчета процессов пластической деформации позволяют определять на основании деформации отдельных элементов сетки изменение глубины поверхностного слоя. Измерив глубину слоя (размер в направлении нормали к поверхности) после моделирования ($H_{\text{слой1}}$) можно сделать вывод о его деформации (рис. 1):

$$e_s = \ln H_{\text{слой1}} / H_{\text{слой0}}$$

где e_s — логарифмическая деформация поверхностного слоя после прокатки; $H_{\text{слой0}}$, $H_{\text{слой1}}$ — глубина поверхностного слоя до и после деформации, мм.

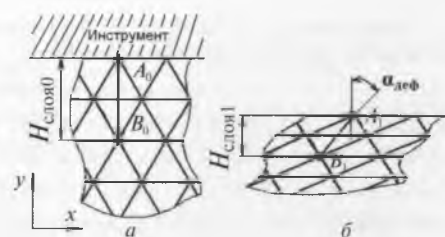


Рис. 1. Вид конечноэлементной сетки в поперечном сечении раската до (а) и после деформации (б)

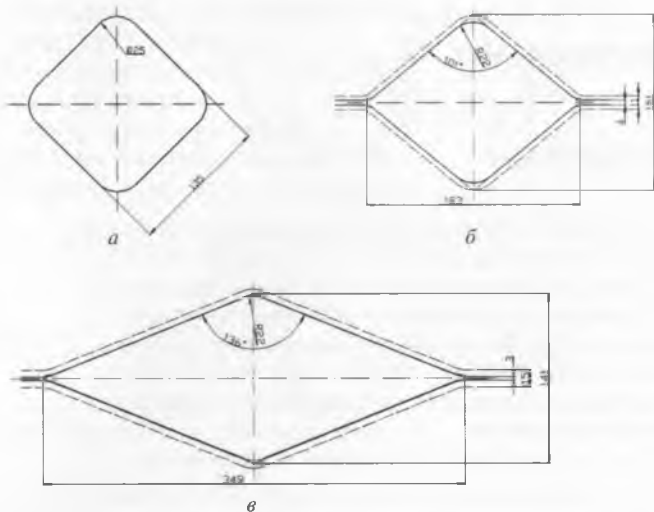


Рис. 2. Вид заготовки (а) и инструмента (б, в) для моделирования прокатки квадратной заготовки в ромбическом калибре

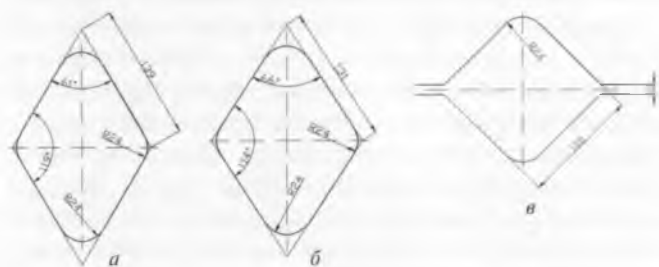


Рис. 3. Вид заготовки (а, б) и инструмента (в) для моделирования прокатки ромбической заготовки в квадратном калибре

Величина e_s характеризует выкатываемость дефектов — уменьшение глубины их залегания и в конечном счете определяет необходимую глубину зачистки готового проката.

Система калибров “ромб — квадрат”. Исследование проводили при прокатке квадратной заготовки в ромбическом калибре (рис. 2) и ромбической заготовки в квадратном калибре (рис. 3). Материал заготовки —

Таблица 1. План проведения полнофакторного эксперимента при прокатке квадратной заготовки в ромбическом калибре

| Уровень и интервал варьирования факторов | Варьируемые факторы | | Угол при вершине калибра, град |
|------------------------------------------|---------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| | коэффициент вытяжки | начальная глубина дефекта, мм | |
| Нулевой уровень $X_i = 0$ | 1,22 | 3 | 118 |
| Интервал варьирования | 0,08 | 1,5 | 18 |
| Верхний уровень $X_i = 1$ | 1,3 | 4,5 | 136 |
| Нижний уровень $X_i = -1$ | 1,14 | 1,5 | 100 |

Таблица 2. План проведения полнофакторного эксперимента при прокатке ромбической заготовки в квадратном калибре

| Уровень и интервал варьирования факторов | Варьируемые факторы | |
|------------------------------------------|---------------------|-------------------------------|
| | коэффициент вытяжки | начальная глубина дефекта, мм |
| Нулевой уровень $X_i = 0$ | 1,22 | 3 |
| Интервал варьирования | 0,08 | 1,5 |
| Верхний уровень $X_i = 1$ | 1,3 | 4,5 |
| Нижний уровень $X_i = -1$ | 1,14 | 1,5 |

сталь 4Х5МФС. Коэффициент вытяжки изменялся от 1,1 до 1,32. Начальную глубину дефектов принимали равной 1 и 3 % от стороны заготовки. Угловая скорость вращения валков — 20 с^{-1} . Константа поверхности [7] — 0,65. Начальная температура прокатки — $1100 \text{ }^\circ\text{C}$. Размеры поперечного сечения заготовки — 135×135 мм. Диаметр валков по буртам — 630 мм. Исходные данные для проведения полнофакторного эксперимента [8] приведены в табл. 1 и 2. Изменение коэффициента вытяжки при моделировании прокатки квадратной заготовки в ромбическом калибре достигалось путем изменения зазора и, соответственно, высоты калибра.

Изменение коэффициента вытяжки при моделировании прокатки ромбической заготовки в квадратном калибре достигалось путем изменения площади (соотношения диагоналей) заготовки. Для сравнительного анализа результатов моделирования задавали одинаковые значения коэффициентов вытяжки для обоих случаев прокатки.

После обработки результатов моделирования проведен анализ изменения глубины поверхностного слоя по площади четверти заготовки (рис. 4): по оси абсцисс отложены относительные координаты точек поверхностного слоя до деформации x_i/b_0 , по оси ординат — логарифмическая деформация поверхностного слоя после прокатки e_s (рис. 5).

Рассмотрим результаты, полученные при прокатке в “узком” и “широком” ромбических калибрах, а также в квадратном калибре. При прокатке квадратной заготовки в “узком” ромбическом калибре наблюдается равномерная деформация поверхностного слоя. Это связано с подобием формы калибра и формы заготовки. Контактная деформация металла осуществляется практически по всему периметру заготовки. При прокатке в “широком” ромбе интенсивная деформация поверхностного слоя происходит только в области контакта заготовки с инструментом, а в области боковых внеконтактных зон глубина слоя практически не меняется. Подобная картина наблюдается и при прокатке ромбической заготовки в квадратном калибре.

Следует обратить внимание на увеличение глубины поверхностного слоя в области начала боковых внеконтактных зон, которое происходит в результате своеобразного “тормозящего” воздействия боковых



Рис. 4. К определению относительной координаты x_i/b_0

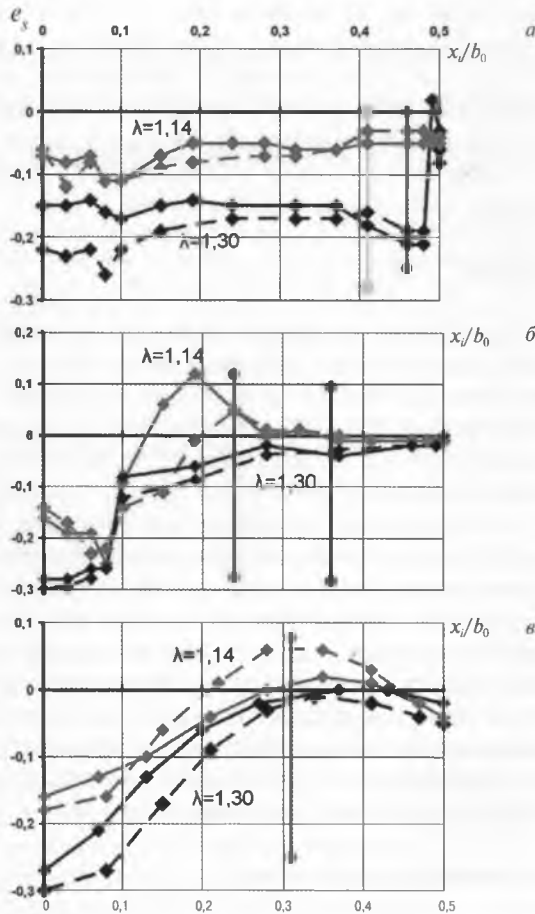


Рис. 5. Изменение глубины поверхностного слоя при прокатке квадратной заготовки в ромбическом калибре с минимальным (а) и максимальным (б) значением угла при вершине, и при прокатке ромбической заготовки в квадратном калибре (в): — — максимальная глубина слоя; - - - минимальная глубина слоя

зон. Уменьшение глубины поверхностного слоя на боковой грани при прокатке ромбической заготовки объясняется интенсивной деформацией внутренних слоев для данной схемы прокатки. В целом для данной системы калибров деформация поверхностного слоя осуществляется равномерно с увеличением глубины во внеконтактных боковых зонах.

Система калибров “овал – круг”. Исследование проводили при условиях прокатки круглой заготовки в овальном калибре (рис. 6) и овальной заготовки в круглом калибре (рис. 7). Материал заготовки — сталь 4Х5МФС. Коэффициент вытяжки изменялся от 1,1 до 1,32. Начальная глубина дефектов составляла 1 и 3 % от диаметра заготовки. Угловая скорость вращения валков 20 с^{-1} . Константа поверхности по А. Н. Леванову [7] — 0,65. Начальная температура прокатки — $1100 \text{ }^\circ\text{C}$. Размеры заготовки — диам. 150 мм. Диаметр валков по буртам 630 мм. План проведения полнофакторного эксперимента приведен в табл. 3 и 4.

Изменение коэффициента вытяжки при моделировании прокатки круглой заготовки в овальном калибре достигалось путем варьирования зазора (высоты калибра); при моделировании прокатки овальной заготовки в круглом калибре — путем изменения пло-

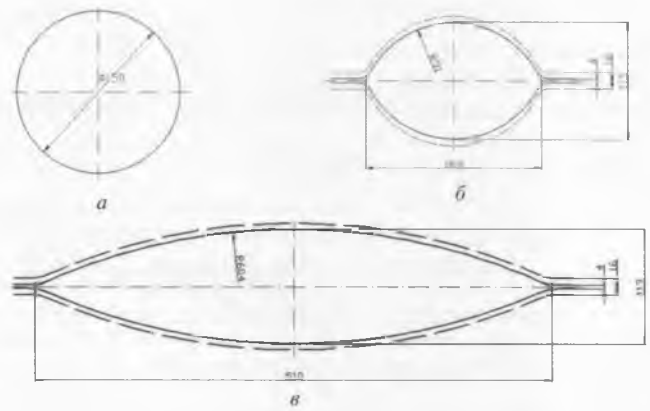


Рис. 6. Вид заготовки (а) и инструмента (б, в) для моделирования прокатки круглой заготовки в овальном калибре

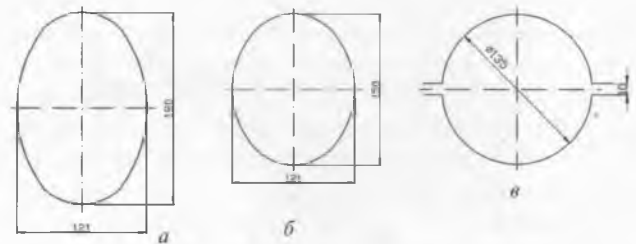


Рис. 7. Вид заготовки (а, б) и инструмента (в) для моделирования прокатки овальной заготовки в круглом калибре

щади (соотношения сторон) заготовки. Причем с целью сравнительного анализа результатов моделирования задавались одинаковые значения коэффициентов вытяжки для обоих случаев прокатки.

Исследование деформации поверхностного слоя в системе “овал – круг” проводилось для четверти периметра. Результаты приведены на рис. 8.

При прокатке в калибре большего радиуса максимальная деформация поверхностного слоя больше, но во внеконтактной зоне поверхностный слой практически не деформируется. В калибре с минимальным

Таблица 3. План проведения полнофакторного эксперимента при прокатке круглой заготовки в овальном калибре

| Уровень и интервал варьирования факторов | Варьируемые факторы | | Радиус овала, мм |
|------------------------------------------|---------------------|-------------------------------|------------------|
| | коэффициент вытяжки | начальная глубина дефекта, мм | |
| Нулевой уровень $X_i = 0$ | 1,22 | 3 | 347,5 |
| Интервал варьирования | 0,08 | 1,5 | 256,5 |
| Верхний уровень $X_i = 1$ | 1,3 | 4,5 | 604 |
| Нижний уровень $X_i = -1$ | 1,14 | 1,5 | 91 |

Таблица 4. План проведения полнофакторного эксперимента при прокатке овальной заготовки в круглом калибре

| Уровень и интервал варьирования факторов | Варьируемые факторы | |
|------------------------------------------|---------------------|-------------------------------|
| | коэффициент вытяжки | начальная глубина дефекта, мм |
| Нулевой уровень $X_i = 0$ | 1,22 | 3 |
| Интервал варьирования | 0,08 | 1,5 |
| Верхний уровень $X_i = 1$ | 1,3 | 4,5 |
| Нижний уровень $X_i = -1$ | 1,14 | 1,5 |

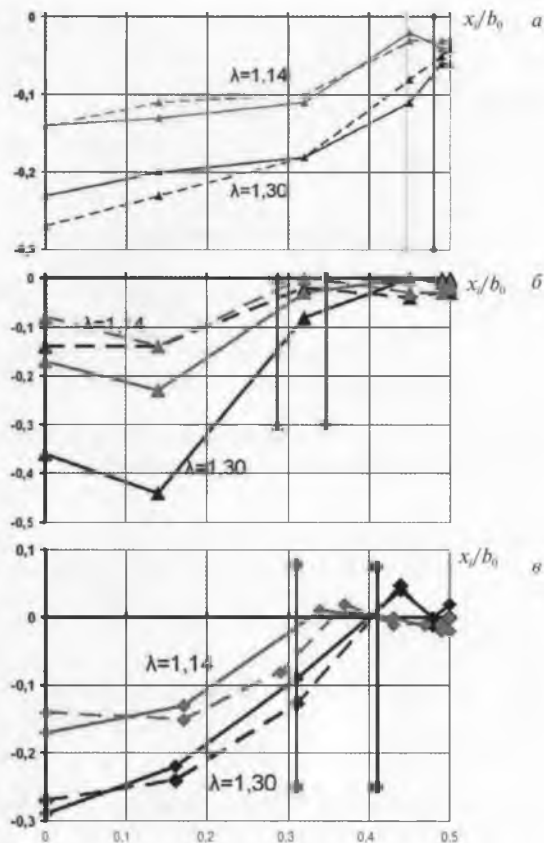


Рис. 8. Изменение глубины поверхностного слоя при прокатке круглой заготовки в овальном калибре с минимальным (а) и максимальным (б) радиусом и овальной заготовки в круглом калибре (г):
 — — — максимальная глубина слоя,
 - - - минимальная глубина слоя

радиусом деформация распределена более равномерно. В более широком калибре максимальная деформация несколько смещена от вершины калибра, что объясняется более развитой зоной затрудненной деформации. В данной системе калибров также наблюдается увеличение глубины поверхностного слоя, но только для условий прокатки овальной заготовки в круглом калибре (см. рис. 8).

Для двух систем калибров наблюдается одинаковое влияние глубины поверхностного слоя и коэффициента вытяжки на деформацию приконтактного слоя. Для “узких” калибров начальная глубина слоя незначительно влияет на распределение деформации по периметру. Однако при прокатке в широких калибрах влияние начальной глубины слоя существен-

ное — чем больше глубина слоя, тем более интенсивно проходит деформация. С увеличением коэффициента вытяжки увеличивается деформация поверхностного слоя. Во внеконтактной зоне, где отсутствует непосредственное действие инструмента, коэффициент вытяжки не имеет существенного влияния на деформацию поверхностного слоя.

Выводы

1. Предложена методика исследования трансформации поверхностных дефектов на основании анализа деформации приконтактного слоя металла с использованием трехмерной математической модели расчета параметров пластической деформации при сортовой прокатке.

2. Теоретически определено комплексное влияние коэффициента вытяжки, параметров калибров и заготовки на деформацию приконтактного слоя металла при прокатке в ромбических, квадратных, овальных и круглых калибрах. Сравнительный анализ результатов исследований показывает, что деформация поверхностного слоя в калибрах системы “овал — круг” менее равномерна, чем в системе “ромб — квадрат”, однако при этом наблюдается более интенсивное изменение глубины поверхностного слоя.

Библиографический список

1. Юдович С. З., Канев М. С. Причины образования морщин на круглом профиле в крупносортовом стане // *Сталь*. 1957. № 10. С. 925 — 928.
2. Дефекты стальных слитков и проката : справочник / В. В. Правосудович, В. П. Сокуренок, В. Н. Данченко и др. — М. : Интермет Инжиниринг, 2006. — 384 с.
3. ГОСТ 21014 — 88. Прокат черных металлов. Термины и определения дефектов поверхности.
4. Производство трубной заготовки / А. П. Чекмарев, Р. А. Машковцев, О. П. Носенко и др. — М. : Металлургия, 1970. — 304 с.
5. Левченко Л. Н., Гринавцев В. Н., Рыбась В. С., Огинский И. К. Исследование поведения дефектов при прокатке в ящичных и четырехвалковых калибрах // *Металлургия и коксохимия*. 1982. № 78. С. 28 — 32.
6. Зильберг Ю. В., Миленин А. А. Теоретическое и экспериментальное исследование формоизменения поверхностных дефектов впадин при прокатке // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1998. № 11. С. 27 — 29.
7. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением / А. Н. Леванов, В. Л. Колмогоров, С. П. Буркин и др. — М. : Металлургия, 1976. — 416 с.
8. Новик Ф. С., Арсов Я. Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. — М. : Машиностроение, 1980 — 304 с.

Оценка стабильности качества сортового проката из конструкционной стали ответственного назначения

Канд. техн. наук А. С. Сальников,
И. А. Алферов, Ж. А. Торопова,
канд. техн. наук В. В. Лоза, Е. Ю. Сахарова
ПАО “Днепроспецсталь”
(г. Запорожье, Украина)

Проведено исследование стабильности механических свойств сортового проката diam. 10 – 200 мм из конструкционных сталей 12Х2Н4А-Ш, 40ХН2МА-Ш, 30ХГСА ответственного назначения с использованием в качестве оценки совокупного параметра качества $R_{п.к.}$. Полученные в результате статистического анализа значения $R_{п.к.}$ механических свойств сортового проката из сталей 12Х2Н4А-Ш и 40ХН2МА-Ш характеризуют процесс производства металлопродукции как стабильный и контролируемый. Низкий уровень $R_{п.к.} \leq 0,67$ механических свойств сортового проката из стали 30ХГСА потребовал проведения мероприятий по корректировке технологических параметров производства, после внедрения которых удалось получить положительный результат со значительным повышением уровня $R_{п.к.}$.

Ключевые слова: качество стали, химический состав, механические свойства, оценка стабильности качества, статистические методы управления.

Использование на практике статистических методов управления качеством продукции дает возможность исследовать стабильность технологического процесса, определять возможные отклонения от нормативных значений, что позволяет своевременно разрабатывать корректирующие мероприятия для совершенствования технологии производства и получения металлопродукции с оптимальными свойствами.

Область применения статистических методов в управлении качеством продукции чрезвычайно широка и охватывает весь жизненный цикл продукции (от разработки и производства до потребления).

Одной из основных составляющих управления качеством продукции является статистический анализ точности и стабильности технологического процесса. Система менеджмента качества, действующая на ПАО “Днепроспецсталь”, отвечает всем требованиям международного стандарта ISO 9001:2008, в том числе по использованию статистических методов управления качеством. Изготовление продукции осуществляется в соответствии с технологическими инструкциями, в которых четко и всесторонне регламентируются требования к ведению технологических процессов, идентификации и прослеживаемости продукции. Соответствие производимой заводом металлопродукции требованиям нормативных документов (НД) обеспечивается соблюдением технологии, исправностью оборудования и контролем в процессе производства, испытаниями и окончательной приемкой. В Общем руководстве по качеству в разделе “Измерение, анализ, улучшение” описывается ряд процессов, в соответствии с которыми в ПАО “Днепроспецсталь” осуществляется мониторинг и измерение, анализ, улучшение производственного цикла. Полученные данные измерений анализируются и в результате разрабатываются направления корректировки параметров процессов.

На предприятии постоянно ведутся работы по совершенствованию действующей технологии, разработке и внедрению новых технологий, направленных на расширение марочного сортамента завода и улучшение показателей качества выпускаемой металлопродукции. Удостоверение соответствия качества выпускаемой металлопродукции требованиям НД на поставку, оценка стабильности характеристик серийного

контроля материала подтверждаются сертификатами качества, что является необходимым условием выхода на международный рынок. Сертификация выпускаемой металлопродукции проводится наиболее престижными международными сертификационными центрами, которые предъявляют жесткие требования к статистическим показателям качества.

Оценка качества серийного материала проводится по результатам приемо-сдаточного контроля параметров качества продукции: химического состава, макро- и микроструктуры, характеристик механических свойств и др. на соответствие требованиям НД. Руководствуясь требованиями международных сертификационных центров АРМАК, “ТЮФ Тюринге”, при анализе статистических данных химического состава и стандартных механических свойств определяются такие дескриптивные (описательные) статистики, которые дают общую информацию о распределении исследуемого параметра качества продукции:

минимальное и максимальное значения оцениваемого параметра;

среднее значение оцениваемого параметра (\bar{X}) или оценка среднего, вычисляемая как среднее арифметическое наблюдений (центр распределения);

стандартное отклонение (рассеяние) (σ) — мера изменчивости (вариации) параметра, отражающая его разброс относительно среднего арифметического;

коэффициент вариации (V) — показывает относительное колебание отдельных значений около среднего арифметического и выражает меру изменчивости параметра в процентах.

Такого рода предварительная оценка в ходе анализа уточняется на основе определения вида и соответствующих параметров распределения, проверки стабильности контролируемых характеристик в течение производства продукции. Поведение измеряемых характеристик механических свойств подчиняется закону нормального распределения (или распределениям, незначительно отличающимся от нормального), параметрами которого являются среднее арифметическое и стандартное отклонения. Кривая функции нормального распределения имеет колоколообразную форму и две точки перегиба, расстояние от которых до вершины равно стандартному отклонению (σ). Наиболь-

Таблица 1. Химический состав плавок стали 12Х2Н4А-Ш и 40ХН2МА-Ш, мас. %

| Плавка/марка | C | Si | Mn | Cr | Ni | Mo | V | W | Cu | Ti | S | P |
|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|------|------|-------|-------|-------|
| № 1/12Х2Н4А-Ш | 0,13 | 0,31 | 0,41 | 1,29 | 3,65 | 0,08 | 0,01 | 0,01 | 0,15 | 0,001 | 0,003 | 0,007 |
| № 2/12Х2Н4А-Ш | 0,10 | 0,28 | 0,52 | 1,38 | 3,30 | 0,09 | 0,01 | 0,08 | 0,17 | 0,003 | 0,008 | 0,005 |
| Нормативные требования | 0,10 – 0,15 | 0,17 – 0,37 | 0,30 – 0,60 | 1,25 – 1,65 | 3,25 – 3,65 | 0,15 | 0,05 | 0,20 | 0,25 | 0,03 | 0,012 | 0,016 |
| № 1/40ХН2МА-Ш | 0,40 | 0,33 | 0,67 | 0,74 | 1,44 | 0,18 | 0,01 | 0,02 | 0,20 | 0,001 | 0,003 | 0,009 |
| № 2/40ХН2МА-Ш | 0,41 | 0,30 | 0,59 | 0,74 | 1,46 | 0,18 | 0,01 | 0,01 | 0,17 | 0,001 | 0,003 | 0,008 |
| № 3/40ХН2МА-Ш | 0,43 | 0,25 | 0,66 | 0,75 | 1,48 | 0,17 | 0,01 | 0,04 | 0,17 | 0,002 | 0,003 | 0,009 |
| № 4/40ХН2МА-Ш | 0,38 | 0,34 | 0,61 | 0,67 | 1,36 | 0,18 | 0,01 | 0,01 | 0,16 | 0,002 | 0,003 | 0,006 |
| Нормативные требования | 0,37 – 0,44 | 0,17 – 0,37 | 0,50 – 0,80 | 0,60 – 0,90 | 1,25 – 1,65 | 0,15 – 0,25 | 0,05 | 0,20 | 0,25 | 0,03 | 0,012 | 0,016 |

Таблица 2. Статистические показатели серийного контроля характеристик механических свойств сортового проката diam. 10 – 200 мм из стали 12Х2Н4А-Ш

| Характеристика | Требования НД* | $\frac{X_{\min} - X_{\max}}{\bar{X}}$ | Рассеяние σ | Коэффициент вариации $V, \%$ | $P_{п.к}$ |
|---------------------------------------|----------------|---------------------------------------|--------------------|------------------------------|-----------|
| $\sigma_r, \text{кгс/мм}^2$ | 85/— | 100,0 – 114,0/109,18 | 3,56 | 3,26 | 2,26 |
| $\sigma_b, \text{кгс/мм}^2$ | 105/— | 123,0 – 134,0/129,51 | 2,93 | 2,26 | 2,78 |
| $\delta_5, \%$ | 12/— | 12,5 – 20,0/16,71 | 2,10 | 12,56 | 0,74 |
| $\psi, \%$ | 55/— | 61,0 – 72,0/66,46 | 2,43 | 3,65 | 1,57 |
| $KCU, \text{кгс} \cdot \text{м/мм}^2$ | 10/— | 11,2 – 16,6/13,76 | 1,10 | 7,99 | 1,13 |
| Диаметр отпечатка, мм | 3,0/3,5 | 3,1 – 3,35/3,14 | 0,063 | 2,0 | 0,77 |

Примечание. Объем выборки: количество плавок/образцов – 2/32. Закон распределения – негауссовский.

* В числителе – нижний предельно допустимый уровень, в знаменателе – верхний.

шая частота приходится на середину интервала и плавно спадает к его концам, кривая симметрична относительно среднего, т. е. теоретически значения измерений находятся в пределах от $-\infty$ до $+\infty$. Площадь под кривой нормального распределения (кривая Гаусса) равна 1 или 100 % независимо от величины стандартного отклонения. Характерное свойство нормального распределения, состоящее в том, что оно подчиняется правилу $\pm 2\sigma$ – $\pm 3\sigma$ -стандартных отклонений (трех сигм), позволяет вычислять вероятность попадания значений переменной в заданные предельно допустимые НД границы (ВГ или НГ) или определять процент выпадов, оказавшихся за заданными границами допуска. Область внутри $\pm 3\sigma$ (трехсигмовых) границ называется областью статистического допуска процесса, который равен 6σ .

Интегральным критерием оценки стабильности соответствия контролируемых характеристик качества продукции требованиям НД и пригодности процесса серийного производства продукции является совокупный параметр качества $P_{п.к}$, определяемый как отношение размаха допуска (границ НД) к размаху процесса (или статистическому допуску нашего процесса).

Если $P_{п.к} < 0,67$ – процесс производства нестабильный (неконтролируемый) и требует корректировки.

Если $0,67 \leq P_{п.к} \leq 1,11$ – процесс производства стабильный (контролируемый), но требует проведения дополнительного анализа и возможной корректировки.

При $P_{п.к} > 1,11$ процесс стабильный, контролируемый и управляемый.

Для случая задания верхнего и нижнего предела характеристик по НД (НГ – нижний предельно допустимый уровень, ВГ – верхний предельно допустимый уровень):

$$P_{п.к} = \min(C_n^{НГ}; C_n^{ВГ}),$$

где $C_n^{НГ} = (\bar{X} - НГ) / 3\sigma$ – нижний показатель пригодности процесса; $C_n^{ВГ} = (ВГ - \bar{X}) / 3\sigma$ – верхний показатель пригодности процесса.

Для случая задания только нижнего предела характеристики:

$$P_{п.к} = C_n^{НГ},$$

где $C_n^{НГ} = (\bar{X} - НГ) / 3\sigma$.

С целью изучения стабильности технологического процесса производства сортового проката diam. 10 – 200 мм из конструкционных сталей 12ХН2МА-Ш, 40ХН2МА-Ш, 30ХГСА для использования в авиационной промышленности исследовали стабильность механических свойств, которая является одним из основных требований, предъявляемых к сталям и сплавам для изготовления изделий ответственного назначения.

Для формирования массивов данных по химическому составу и механическим свойствам для каждой марки стали использовали фиксируемые в информационно-вычислительной сети завода данные серийного приемо-сдаточного контроля металлопродукции. Статистический анализ проводили с помощью аналитических инструментов программного пакета статистической обработки данных “Statistica” фирмы “Stat Soft”.

По итогам статистического анализа механических свойств сортового проката diam. 10 – 200 мм из конструкционных сталей 12Х2Н4А-Ш и 40ХН2МА-Ш, выплавленных методом электрошлакового переплава, химический состав (табл. 1) которых соответствовал требованиям НД на поставку по основным легирующим элементам и регламентируемым примесям, были получены следующие результаты соответствия критериям оценки стабильности технологического процесса.

Как показали результаты испытаний, механичес-

Таблица 3. Статистические показатели серийного контроля характеристик механических свойств сортового проката diam. 10 – 200 мм из стали 40ХН2МА-Ш

| Характеристика | Данные НД* | $\frac{X_{\min} - X_{\max}}{\bar{X}}$ | Рассеяние σ | Коэффициент вариации V , % | $P_{п.к}$ |
|----------------------------------|------------|---------------------------------------|--------------------|------------------------------|-----------|
| σ_T , кгс/мм ² | 85/— | 87,0 – 98,0/93,76 | 3,07 | 3,27 | 0,95 |
| σ_B , кгс/мм ² | 100/— | 103,0 – 113,5/108,85 | 2,98 | 2,73 | 0,98 |
| δ_5 , % | 12/— | 17,5 – 26,0/20,5 | 1,95 | 9,50 | 1,45 |
| ψ , % | 55/— | 55,5 – 68,5/63,69 | 2,85 | 4,47 | 1,01 |
| КСУ, кгс · м/мм ² | 10/— | 11,0 – 16,5/12,78 | 1,14 | 8,90 | 0,81 |
| Диаметр отпечатка, мм | 3,3/3,55 | 3,35 – 3,50/3,42 | 0,043 | 1,25 | 0,93 |

Примечание. Объем выборки: количество плавков/образцов — 2/32. Закон распределения — негауссовский.

* В числителе — нижний предельно допустимый уровень, в знаменателе — верхний.

кие свойства сортового проката diam. 10 – 200 мм из стали 12Х2Н4А-Ш соответствуют требованиям ТУ на поставку (табл. 2), при этом материал обладает повышенными прочностными характеристиками при достаточно высокой пластичности, что вполне закономерно для металла, выплавляемого с применением электродугового переплава.

По пределу текучести и временному сопротивлению $P_{п.к}$ составляет 2,26 и 2,78 соответственно. Материал при большом запасе прочностных свойств имеет достаточно стабильные пластические свойства, обеспечивающие $P_{п.к} > 0,7$ по относительному удлинению (δ) и $> 1,1$ по относительному сужению (ψ) и ударной вязкости (КСУ). В целом, оценивая статистические показатели механических свойств сортового проката плавков № 1 и 2 и полученные на их основе значения показателя $P_{п.к}$, можно сделать вывод, что процесс производства является стабильным и удовлетворяет требованиям НД на поставку.

Результаты испытаний механических свойств сортового проката из стали 40ХН2МА-Ш (табл. 3) и полученные на их основе значения $P_{п.к}$ в интервале 0,67 – 1,11 характеризуют процесс производства металлопродукции как стабильный и контролируемый. По мере поступления заказов на данный вид металлопродукции требуются проведение дополнительного анализа и возможная его корректировка.

Стабильность технологического процесса производства сортового проката diam. 10 – 200 мм из стали 30ХГСА исследовали на двух массивах плавков в зависимости от метода выплавки: с вакуумированием (VD) — 7 плавков; без вакуумирования (УКП) — 12 плавков. Статистические показатели уровня основных легирующих и модифицирующих химических элементов (Al, V, Ca), а также регламентированных примесей химического состава плавков стали 30ХГСА, выплавленных по двум технологиям (с вакуумированием/без вакуумирования) представлены в табл. 4.

Статистический анализ механических свойств сортового проката diam. 10 – 200 мм из стали 30ХГСА, выплавленного с вакуумированием (числитель) и без вакуумирования (знаменатель), показал, что они обеспечивают требования НД на поставку (табл. 5).

Вместе с тем следует отметить, что металл обладает низким запасом прочностных свойств — среднее

значение предела текучести (σ_T) и временного сопротивления (σ_B) смещено ближе к нижней нормативной границе. При полученных значениях рассеяния, коэффициента вариации и среднего значения, смещенного к нижней нормативной границе, совокупный параметр качества $P_{п.к}$ имеет низкий уровень для металла, выплавленного с вакуумированием и без него, и составляет: по пределу текучести — 0,42 и 0,41, по временному сопротивлению — 0,33 и 0,40 соответственно. Это характеризует процесс производства как нестабильный и требующий корректировки. Также получены низкие статистические показатели стабильности относительного сужения (ψ) и ударной вязкости (КСУ) либо за счет широких пределов рассеяния и коэффициента вариации, либо за счет низкого среднего значения характеристики. По одной характеристике пластических свойств металла — относительному удлинению получен результат $P_{п.к}$ по обеим технологиям 1,19 и 1,18 за счет достаточно высокого значения \bar{X} — 17,31 и 17,35 % при установленной нижней границе (НГ) ≥ 10 % и более низких по сравнению с остальными характеристиками значениях рассеяния (σ) — 1,92 и 2,06.

Таким образом, в результате проведенной статистической обработки основных показателей качества металлопродукции — химического состава плавков и механических свойств сортового проката diam. 10 – 200 мм из конструкционной стали 30ХГСА установлено, что технологический процесс производства обеспечивает требования НД документации на поставку, однако является нестабильным. Поэтому необходимы корректировка и оптимизация процесса, направленные на повышение прочностных характеристик, ударной вязкости металла, а также на снижение большого разброса получаемых значений относительного удлинения и относительного сужения.

В результате проведенных исследований по соблюдению технологии выплавки, внепечной обработки, разлива стали, прокатки, термической обработки, условий проведения испытаний, а также сравнительного анализа изменчивости основных контролируемых в процессе производства технологических параметров были предложены корректирующие мероприятия, направленные на повышение химической однородности стали, которая является важнейшим показателем

Таблица 4. Статистические показатели уровня химических элементов стали 30ХГСА

| Химический элемент | VD | | УКП | | Рассеяние σ | | Коэффициент вариации $V, \%$ | | Требования НД* |
|--------------------|-------------------------|------------------------|--------|--------|--------------------|-------|------------------------------|-----|----------------|
| | VD | УКП | VD | УКП | VD | УКП | VD | УКП | |
| C | 0,28–0,32 0,30 | 0,29–0,31 0,30 | 0,016 | 0,008 | 5,27 | 2,64 | 0,28/0,34 | | |
| Mn | 0,88–0,92 0,91 | 0,84–0,94 0,90 | 0,017 | 0,031 | 1,88 | 3,48 | 0,80/1,10 | | |
| Si | 0,94–1,11 1,01 | 0,97–1,05 1,01 | 0,058 | 0,030 | 5,75 | 2,98 | 0,90/1,2 | | |
| Cr | 0,84–0,97 0,89 | 0,83–0,92 0,88 | 0,041 | 0,026 | 4,60 | 3,00 | 0,80/1,10 | | |
| Ni | 0,10–0,18 0,13 | 0,08–0,16 0,13 | 0,027 | 0,021 | 20,83 | 15,39 | –/0,30 | | |
| Cu | 0,14–0,24 0,17 | 0,10–0,25 0,15 | 0,035 | 0,046 | 20,93 | 30,26 | –/0,25 | | |
| V | 0,020–0,030 0,029 | 0,017–0,040 0,030 | 0,004 | 0,008 | 13,23 | 26,62 | –/0,05 | | |
| P | 0,010–0,022 0,016 | 0,005–0,025 0,016 | 0,004 | 0,005 | 27,91 | 28,61 | –/0,025 | | |
| S | 0,002–0,014 0,008 | 0,005–0,019 0,011 | 0,005 | 0,005 | 45,36 | 43,83 | –/0,025 | | |
| Al | 0,014–0,025 0,017 | 0,013–0,020 0,016 | 0,004 | 0,002 | 21,74 | 12,88 | –/– | | |
| Ca | 0,0006–0,0026 0,0018 | 0,001–0,0040 0,0020 | 0,0007 | 0,0010 | 41,29 | 41,17 | –/– | | |

* В числителе — нижний предельно допустимый уровень, в знаменателе — верхний.

Таблица 5. Статистические показатели серийного контроля характеристик механических свойств сортового проката diam. 10 – 200 мм из стали 30ХГСА

| Статистические показатели | $\sigma_r, \text{кгс/мм}^2$ | | $\sigma_b, \text{кгс/мм}^2$ | | $\delta_5, \%$ | | $\psi, \%$ | | $KCU, \text{кгс} \cdot \text{м/мм}^2$ | |
|----------------------------------|-----------------------------|----------|-----------------------------|-----------|----------------|---------|------------|-----------|---------------------------------------|------------|
| | VD | УКП | VD | УКП | VD | УКП | VD | УКП | VD | УКП |
| Требования НД, не менее | 85 | | 110 | | 10 | | 45 | | 5 | |
| Объем выборки (плавков/образцов) | 7/84 | 12/122 | 7/84 | 12/122 | 7/84 | 12/122 | 7/84 | 12/122 | 7/84 | 12/122 |
| $X_{\min} - X_{\max}$ | 85 – 106 | 85 – 107 | 110 – 127 | 110 – 127 | 13 – 22 | 12 – 22 | 45 – 64 | 45 – 64,5 | 5,1 – 9,0 | 5,3 – 10,1 |
| Среднее значение \bar{X} | 92,54 | 9,89 | 114,80 | 115,39 | 17,31 | 17,35 | 53,62 | 53,06 | 6,10 | 6,17 |
| Рассеяние σ | 7,54 | 4,77 | 4,22 | 4,41 | 1,92 | 2,06 | 4,93 | 5,14 | 1,01 | 1,06 |
| Коэффициент вариации $V, \%$ | 6,44 | 5,28 | 3,67 | 3,82 | 11,16 | 12,00 | 9,19 | 9,68 | 16,03 | 17,18 |
| $P_{п.к}$ | 0,42 | 0,41 | 0,33 | 0,40 | 1,19 | 1,18 | 0,58 | 0,52 | 0,34 | 0,37 |

телем качества металлопродукции, обеспечивающим надежность и долговечность стальных конструкций и изделий. С этой целью введены более узкие пределы содержания основных легирующих элементов (C, Si, Mn, Cr).

| Плавка | C | Si | Mn | Cr | Ni | Cu | V | P | S | Al | Ca |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|--------|
| № 1 (VD) | 0,31 | 0,97 | 0,90 | 0,91 | 0,14 | 0,13 | 0,03 | 0,020 | 0,006 | 0,013 | 0,0020 |
| № 2 (УКП) | 0,31 | 1,00 | 0,85 | 0,90 | 0,08 | 0,06 | 0,04 | 0,016 | 0,007 | 0,013 | 0,0037 |

Для обеспечения постоянства результатов, снижения вариации значений при многократных испытаниях механических свойств были приняты меры, направленные на соблюдение условий подобия проведения первичных механических испытаний. В рамках требований НД на поставку проведена корректировка тем-

пературного режима стандартной термической обработки образцов. С учетом принятых изменений технологии производственного процесса были выплавлены две опытные плавки (№ 1 и 2) стали 30ХГСА, химический состав которых представлен ниже (мас. %):

Статистический анализ полученных значений механических свойств сортового проката diam. 16 – 120 мм, изготовленного из этих плавков (табл. 6), показал, что принятые корректирующие меры дали положительный результат для стабилизации большинства характеристик механических свойств, о чем сви-

Таблица 6. Статистические показатели серийного контроля механических свойств сортового проката из стали 30ХГСА опытных плавков

| Статистические показатели | σ_s , кгс/мм ² | | σ_b , кгс/мм ² | | δ_5 , % | | ψ , % | | КСУ, кгс · м/мм ² | |
|----------------------------------|----------------------------------|---------|----------------------------------|-----------|----------------|---------|-------------|-----------|------------------------------|-----------|
| | VD | УКП | VD | УКП | VD | УКП | VD | УКП | VD | УКП |
| Требования НД, не менее | 85 | | 110 | | 10 | | 45 | | 5 | |
| Объем выборки (плавков/образцов) | 1/16 | 1/8 | 1/16 | 1/8 | 1/16 | 1/8 | 1/16 | 1/8 | 1/16 | 1/8 |
| $X_{\min} - X_{\max}$ | 87 - 113 | 89 - 95 | 110 - 125 | 114 - 120 | 14 - 22 | 14 - 19 | 45,5 - 59,5 | 47 - 53,5 | 5,0 - 5,9 | 5,2 - 5,9 |
| Среднее значение \bar{X} | 104,75 | 91,25 | 121,13 | 116,25 | 16,66 | 16,25 | 53,31 | 53,50 | 5,35 | 5,41 |
| Рассеяние σ | 5,80 | 2,12 | 3,96 | 2,12 | 1,86 | 1,98 | 3,20 | 1,94 | 0,29 | 0,23 |
| Коэффициент вариации V , % | 5,54 | 2,33 | 3,26 | 1,82 | 11,16 | 12,19 | 6,01 | 3,86 | 5,42 | 4,24 |
| $P_{п.к}$ | 1,13 | 0,98 | 0,94 | 0,98 | 1,19 | 1,05 | 0,86 | 0,91 | 0,40 | 0,59 |

детельствует значительное повышение уровня совокупного параметра качества $P_{п.к}$ по прочностным и пластическим свойствам металла.

Библиографический список

1. Шиндовский Э., Шюрц О. Статистические методы управления качеством. — М.: Мир, 1976. — 600 с.
2. Боровиков В. Statistica: искусство анализа данных на компьютере для профессионалов. — СПб.: Питер, 2001. — 648 с.

УДК 669.14.018.8

Освоение технологии производства трубной заготовки из коррозионно-стойких сталей дуплексного класса

А. И. Панченко¹, Л. Н. Король¹, А. В. Жайворонков¹,
Л. В. Тур¹, С. А. Панченко², А. Е. Балев²
¹ ПАО “Днепрспецсталь” (г. Запорожье, Украина),
² ЧАО “Сентравис Продакшн Юкрейн”
(г. Никополь, Украина)

Представлены результаты освоения технологии производства трубной заготовки диам. 180 мм в ПАО “Днепрспецсталь” из дуплексных коррозионностойких сталей UNS S 31803, UNS S 32205, DIN 1.4462, 03X22H5AM3. Приведен сравнительный анализ химического состава плавков ПАО “Днепрспецсталь” и трубной заготовки из дуплексных сталей традиционных зарубежных поставщиков. Проведены исследования содержания неметаллических включений в металле, распределения и содержания ферритно-аустенитных фаз, ударной вязкости, стойкости против питтинговой коррозии, деформируемости при высоких температурах.

Ключевые слова: дуплексные коррозионностойкие стали, модифицированные плавки, ферритная фаза, микроструктура, интерметаллидная фаза, стойкость к питтинговой коррозии, деформируемость.

Значительный вес в общем объеме производства труб в странах дальнего зарубежья занимают трубы из дуплексных коррозионностойких сталей (UNS S 31803, UNS S 32205, DIN 1.4462, 03X22H5AM3). Увеличение объемов производства этих сталей обусловлено сочетанием в данном классе сталей лучших механических, технологических, физических свойств с высокой коррозионной стойкостью в различных средах и с хорошей способностью к пластической деформации и свариваемости. Благодаря уникальному сочетанию свойств такие стали широко применяются в нефтеперерабатывающей, нефтехимической, химической, газовой и других отраслях промышленности. Свойства получаемых труб во многом определяются качеством исходной трубной заготовки.

Осваивать производство дуплексной коррозионностойкой стали 03X22H5AM3/UNS S 31803/1.4462 ПАО “Днепрспецсталь” начало в 2003 г. В соответствии с требованиями, предъявляемыми к металлу потребителем ЧАО “Сентравис Продакшн Юкрейн”, была разработана технология выплавки и деформационного передела данной дуплексной марки стали и произведе-

дена поставка первой опытной партии. Качество металла опытной партии соответствовало требованиям протокола поставки, но в связи с предъявлением на рынке к качеству заготовки сталей данного класса новых более жестких требований, не предусмотренных протоколом поставки, производство заготовки из дуплексной коррозионностойкой стали временно приостановили. Новую поставку одной плавки заготовки стали этой марки ЧАО “Сентравис Продакшн Юкрейн” ПАО “Днепрспецсталь” осуществило в 2010 г.

При производстве передельных горячепрессованных труб размером 70×8 мм, изготовленных из первой плавки, на наружной поверхности отмечены дефекты “надрывы”, отпрессованные трубы забракованы по наружной поверхности, оставшийся металл был снят с проката. Содержание ферритной фазы контролировали неразрушающим магнитно-индукционным методом при помощи ферритометра Fisher MP-30. Результаты контроля ферритной составляющей свидетельствуют о неравномерном распределении ферритной фазы по длине образцов, ее содержание колеблется в широком диапазоне от 28,5 до 43,6 %, среднее значе-

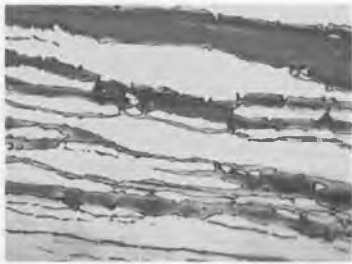


Рис. 1. Микроструктура образцов заготовки из стали UNS S 31803, диам. 180 мм, опытной плавки. ≥ 500

ние — 36,2 %. Низкое содержание ферритной составляющей обусловлено содержанием на нижнем допустимом пределе ферритообразующих элементов Cr (21,12 %) и Mo (2,5 %). Неравномерное распределение ферритной составляющей приводит к анизотропии свойств при прессовании, что негативно сказывается на деформируемости трубной заготовки при производстве горячедеформированных труб. Результаты контроля содержания ферритной составляющей согласуются с контролем микроструктуры и распределения феррит/аустенит трубной заготовки (рис. 1).

На основании результатов исследований качества первой плавки и образцов металла фирм дальнего зарубежья, предоставленных ЧАО “Сентравис Продакшн Юк्रेйн”, ПАО “Днепроспецсталь” была откорректирована технология производства металла: введены суженные пределы содержания легирующих элементов (Cr и Mo), усовершенствованы режимы раскисления, модифицирования стали церием и бором и десульфурации стали. В 2011 г. по усовершенствованной технологии ПАО “Днепроспецсталь” дополнительно произведены и поставлены ЧАО “Сентравис Продакшн Юкрейн” две модифицированные плавки из стали 03X22H5AM3/UNS S 31803/1.4462, в табл. 1 приведен химический состав этой стали в сравнении с составом металла традиционных зарубежных поставщиков трубной заготовки из дуплексных марок сталей. По данным таблицы следует отметить более высокую степень легирования Cr, Mo и Si в модифицированных плавках и более высокий коэффициент PREN по сравнению с первой плавкой [1].

Оценка содержания неметаллических включений проведена в соответствии с ASTM E45 (метод А) и дополнительно — согласно ГОСТ 1778. Загрязненность металла неметаллическими включениями име-

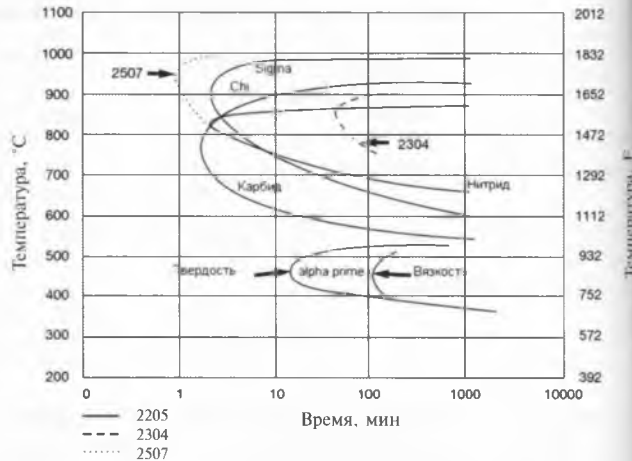


Рис. 2. Диаграмма выделения избыточных фаз в дуплексных сталях 2205, 2304 и 2507

ет допустимый уровень по всем контролируемым параметрам, содержание недеформирующихся силикатов не превышает балла 3.

В дуплексных коррозионностойких сталях наиболее распространенными выделившимися фазами являются Cr_2N и интерметаллидные sigma- и chi-фазы, формирующиеся в интервале 600 – 1000 °C и крайне негативно влияющие на стойкость к коррозии, ударную вязкость и комплекс механических свойств. Скорость протекания реакций осаждения такого типа является структурной функцией [2].

Диаграмма выделения фазы при постоянной температуре для дуплексных коррозионностойких сталей 2304 (соответствует стали UNS S 32304 по DIN 1.4362; химический состав, %: 0,02 C; 23 Cr; 0,2 Mo; 0,1 N), 2205 (соответствует стали UNS S 32750, по DIN 1.4410; химический состав, %: 0,02 C; 25 Cr; 4,0 Mo; 0,27 N) и 2507 (соответствует стали UNS S 31803) показана на рис. 2. Карбид и нитрид хрома выделяются в течение 1 – 2 мин при соответствующей температуре, sigma- и chi-фазы выделяются при немного более высоких температурах, но в течение того же времени. В дуплексных коррозионностойких сталях с большим содержанием Mo и Ni sigma- и chi-фазы образуются быстрее, чем в стали 2205, которая содержит меньше легирующих элементов. Пунктирными линиями на рис. 2 показано, что в более высоколегированной стали 2507 sigma- и chi-фазы образуются быстрее, чем в стали 2304 [3].

Таблица 1. Химический состав стали ПАО “Днепроспецсталь” и традиционных зарубежных поставщиков трубной заготовки из дуплексных сталей

| Плавки | Содержание, % | | | | | | | | | | PREN* |
|----------------------------------------|---------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-----------|-------|
| | C | Cr | Mn | Mo | N | Ni | P | S | Si | | |
| Первая ПАО “Днепроспецсталь” | 0,024 | 21,45 | 1,24 | 2,55 | 0,19 | 5,29 | 0,028 | 0,009 | 0,40 | 32,9 | |
| Модифицированные ПАО “Днепроспецсталь” | 0,030 | 22,35 – 22,40 | 1,74 | 3,12 – 3,17 | 0,14 – 0,16 | 5,17 – 5,21 | 0,026 | 0,003 | 0,45 | 35,2 | |
| Зарубежный поставщик заготовки | 0,020 | 22,0 – 23,0 | 1,6 – 1,8 | 3,15 – 3,50 | 0,13 – 0,17 | 5,1 – 5,45 | 0,022 | 0,001 – 0,002 | 0,3 – 0,5 | 35,6 | |
| Требования зарубежных стандартов | $\leq 0,03$ | 21 – 23 | $\leq 2,00$ | 2,5 – 3,5 | 0,08 – 0,20 | 4,5 – 6,5 | $\leq 0,03$ | $\leq 0,02$ | $\leq 1,00$ | ≥ 35 | |

* PREN — эквивалент стойкости к питтинговой коррозии: $PREN = \%Cr + 3,3(\%Mo + 0,5\%W) + 16\%N$.

Таблица 2. Результаты контроля ударной вязкости согласно ASTM A 923 (метод В) при $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

| № образца | Плавка | Работа удара, Дж |
|--------------------------------|----------------------------------------|------------------|
| 1-1 | Первая ПАО “Днепроспецсталь” | 52,3 |
| 1-2 | | 42,5 |
| 1-3 | | 39,2 |
| 2-1 | Модифицированные ПАО “Днепроспецсталь” | 77,8 |
| 2-2 | | 88,8 |
| 2-3 | | 86,2 |
| Требования ASTM A 923, метод В | | ≥ 54 |

С целью выявления избыточных фаз провели комплексное исследование образцов заготовки в состоянии поставки. Микроструктуру контролировали на наличие избыточных интерметаллидных фаз в соответствии с ASTM A 923 (метод А) путем классификации структур. Для выявления структуры образцы травили в растворе хлорного железа в соответствии с тем же стандартом ASTM. Данный способ контроля, а также ASTM A 923 (метод В), который предусматривает испытание образцов Шарпи на ударную вязкость при $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, применяют с целью обнаружения оседания хрупких интерметаллидных фаз в дуплексных сталях. Структура исследуемых образцов характеризуется отсутствием избыточной интерметаллидной фазы. Результаты контроля ударной вязкости согласно ASTM A 923 (метод В) при $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ представлены в табл. 2, из таблицы видно, что ударная вязкость стали модифицированных плавок удовлетворяет требованиям ASTM A 923, что подтверждает отсутствие интерметаллидных фаз в структуре металла. Первая плавка характеризуется заниженными значениями работы удара, что свидетельствует о наличии в структуре металла хрупкой интерметаллидной фазы. Результаты контроля ударной вязкости согласуются с результатами металлографического контроля содержания ферритной составляющей.

Дополнительно контролировали стойкость против питтинговой коррозии в соответствии с ASTM G-48 (метод А) с применением хлорного железа при $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 72 ч, результаты контроля приведены в табл. 3. Из приведенных данных следует, что полученная скорость коррозии удовлетворяет требованиям стандарта и не превышает значения $0,0001\text{ г/см}^2$.

Содержание ферритной фазы контролировали неразрушающим магнитно-индукционным методом измерения при помощи ферритометра Fisher МН-30 на образцах в состоянии поставки. Результаты сравнительного контроля ферритной составляющей и микроструктуры заготовок производства ПАО “Днепроспецсталь” и традиционного зарубежного поставщика трубной заготовки из дуплексных марок сталей представлены на рис. 3. В результате увеличения ферритной составляющей от 36,2 до 46,43 % за счет повышения степени легирования ферритообразующими элементами Сг и Мо была получена оптимальная структура, обеспечивающая равномерное распределение феррит/аустенит. Полученные контрольные дан-

Таблица 3. Результаты контроля стойкости против питтинговой коррозии

| № образца | Площадь, см^2 | Масса образца, г | | Потеря массы, г | Скорость коррозии, г/см^2 |
|-----------|------------------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------------------------|
| | | до испытания | после испытания | | |
| 1 | 12,9498 | 9,46445 | 9,46390 | 0,0005 | 0,000037 |
| 1-1 | 12,4299 | 9,54080 | 9,53970 | 0,0011 | 0,000088 |
| 2 | 12,9380 | 10,19140 | 10,19060 | 0,0008 | 0,000062 |
| 2-1 | 12,4104 | 8,38810 | 8,38690 | 0,0012 | 0,000097 |

ные подтверждаются результатами высокотемпературных испытаний в интервале $1050 - 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ образцов заготовки в состоянии поставки. Данный метод испытания применяют для определения деформируемости заготовки в заданном температурном интервале.

С целью определения деформируемости заготовки принимают величину относительного сужения ψ , %, при разрыве образца при заданных температуре и скорости нагружения без приложения внешних усилий. В табл. 4 приведены характерные результаты высокотемпературных испытаний на деформируемость трубных заготовок диам. 180 мм из дуплексной стали зарубеж-

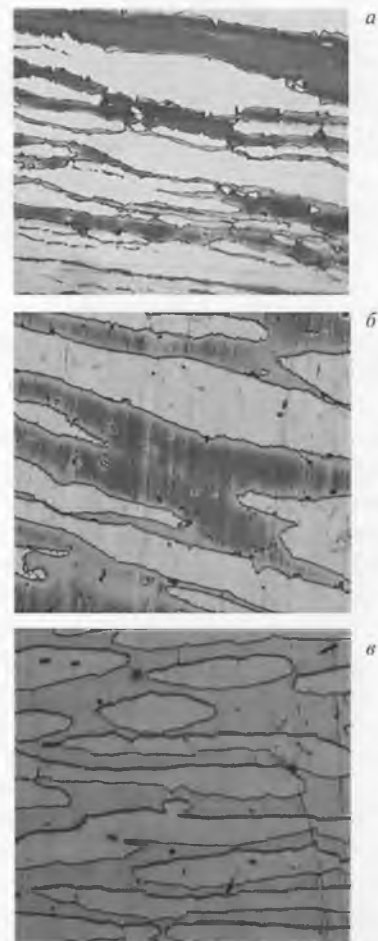


Рис. 3. Микроструктура ($\times 500$) и содержание ферритной фазы в сталях ПАО “Днепроспецсталь” и зарубежного поставщика. Поставка; содержание по 30 замерам: min – max/среднее соответственно: а – первая плавка ПАО “Днепроспецсталь”; 28,5 – 43,6/36,2; б – модифицированные плавки ПАО “Днепроспецсталь”; 43 – 49,7/46,43; в – зарубежный поставщик; 45,2 – 52,4/49,5

Таблица 4. Результаты испытаний на деформируемость трубных заготовок диам. 180 мм из дуплексной стали зарубежных поставщиков и из стали опытной и модифицированной плавки ПАО “Днепроспецсталь”

| Марка стали | Условный номер образца | Температура испытания, °С | Относительное сужение, % |
|------------------------------------------------------|------------------------|---------------------------|--------------------------|
| | Зарубежный поставщик | | |
| UNS S 31803 | 1 | 1050 | 88 |
| | 2 | 1100 | 86 |
| | 3 | 1150 | 91 |
| | 4 | 1200 | 93 |
| UNS S 32760 | 1 | 1050 | 83,5 |
| | 2 | 1110 | 89 |
| | 3 | 1150 | 88,5 |
| | 4 | 1200 | 89,5 |
| | 5 | 1230 | 88 |
| UNS S 32750 | 1 | 1050 | 82 |
| | 2 | 1100 | 88,5 |
| | 3 | 1150 | 88 |
| | 4 | 1200 | 91 |
| Первая плавка ПАО “Днепроспецсталь” | | | |
| UNS S 31803 | 1 | 1050 | 62 |
| | 2 | 1050 | 63 |
| | 21 | 1100 | 68 |
| | 12 | 1100 | 59 |
| | 31 | 1150 | 59 |
| | 32 | 1150 | 56 |
| | 34 | 1200 | 58 |
| | 35 | 1200 | 61,5 |
| Модифицированные плавки ПАО “Днепроспецсталь” | | | |
| UNS S 31803 | 3 | 1050 | 75,5 |
| | 4 | 1050 | 86,5 |
| | 4 | 1100 | 86,5 |
| | 5 | 1100 | 77,0 |
| | 8 | 1150 | 84,5 |
| | 9 | 1150 | 85,0 |
| | 11 | 1200 | 87,5 |
| | 12 | 1200 | 88,0 |

ных поставщиков и из опытной и модифицированной плавки ПАО “Днепроспецсталь”. Из данных таблицы видно, что относительное сужение образцов первой плавки находятся в пределах 58 – 68 % и в среднем составляет 61 %. Образцы от заготовок модифицирован-

ных плавков обладают удовлетворительной пластичностью во всем температурном диапазоне, значения ψ находятся в пределах 75,0 – 88,0 %. Согласно данным зарубежных источников, металл заготовок из дуплексных и супердуплексных сталей считается технологичным при минимальном значении $\psi = 75$ %. Горячепрессованные передельные и холоднодеформированные трубы готового размера из заготовки диам. 180 мм, модифицированных плавков из сталей ASTM UNS S 3180/DIN 1.4462/ГОСТ 03X22H5AM3 поставки ПАО “Днепроспецсталь” характеризуются удовлетворительной деформируемостью и обеспечивают требования нормативной документации в полном объеме.

Выводы

1. Разработанная технология раскисления и модифицирования стали и введение суженных пределов содержания легирующих элементов Cr и Mo в сталях ASTM UNS S 3180/DIN 1.4462/ГОСТ 03X22H5AM3 позволила получить оптимальную структуру, обеспечивающую равномерное фазовое распределение феррит/аустенит, что гарантировало последующую удовлетворительную деформируемость в диапазоне 1050 – 1200 °С.

2. Горячепрессованные передельные и холоднодеформированные трубы готового размера из заготовки диам. 180 мм, модифицированных плавков из сталей ASTM UNS S 3180/DIN 1.4462/ГОСТ 03X22H5AM3 поставки ПАО “Днепроспецсталь” характеризуются удовлетворительной деформируемостью и обеспечивают требования нормативной документации в полном объеме.

Библиографический список

1. Улиг Г. Г., Ревя Р. У. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику / пер. с англ. под ред. А. М. Сухотина. — Л. : Химия, 1989. — 456 с.
2. Улянин Е. А. Структура и коррозия металлов и сплавов. Справочник. — М. : “Металлургия”, 1989. — 398 с.
3. Magnabosko R. Kinetic of sigma phase formation in Duplex Stainless Steel // Materials Research. 2009. Vol. 12. No. 3. P. 327.

Концепция развития деформационно-термической обработки специальных сталей в потоке прокатных станов

И. Н. Логозинский², канд. техн. наук А. Н. Тумко²,
канд. техн. наук А. С. Сальников²,
канд. техн. наук Ю. В. Артамонов¹,
канд. техн. наук Я. И. Спектор¹, И. Н. Кунишкая¹
¹ ГП “УкрНИИспецсталь” (г. Запорожье, Украина),
² ПАО “Днепроспецсталь” (г. Запорожье, Украина)

При развитии производства конкурентоспособного проката из специальных сталей для стратегических отраслей промышленности предлагается использовать технологию совмещенной деформационно-термической обработки. В результате реализации двух основных схем (прямая и предварительная) совмещенной деформационно-термической обработки достигается улучшение физико-механических свойств различных специальных сталей и существенное энергосбережение при их термической обработке. Проанализировано состояние оснащённости сортопрокатных станов специалметаллургии современным оборудованием. Для внедрения совмещенной технологии рекомендуется дооснащение прокатно-термического комплекса или его реконструкция с созданием специализированных модульных линий деформационно-термической обработки, интегрированных в поток прокатки.

Ключевые слова: прокатка, закалка, нормализация, улучшение проката, последеформационное охлаждение, механические свойства, фазовые превращения, аустенит.

Большая часть сортамента проката специальных сталей и сплавов производится с термической обработкой, которая обеспечивает требуемую структуру металла и необходимые технологические и служебные свойства, предотвращает образование поверхностных и внутренних трещин напряжения, флокенов. В связи с этим заводы, производящие прокат из специальных сталей, имеют различное оборудование для термической обработки: колодцы и термосы для замедленного охлаждения проката, термические печи, устройства ускоренного последеформационного охлаждения металла в потоке прокатных станов.

Перспективным направлением в развитии производства специальных сталей является совмещение в потоке сортовых станов горячей деформации и термической обработки. При этом создаются необходимые условия для формирования регламентированной структуры металла. В результате улучшаются механические свойства сталей — пластичность, прочность, вязкость разрушения, выполняются повышенные требования современных отечественных и зарубежных стандартов и достигается энергосберегающий эффект за счет использования тепла прокатного нагрева взамен отдельного нагрева под термическую обработку или за счет сокращения длительности термической обработки [1–8]. Современный марочный сортамент проката из специальных сталей и виды их традиционной термической обработки в состоянии поставки (нормализация, закалка, отжиг и др.) представлены в табл. 1.

Рассмотрены две основные схемы совмещенной деформационно-термической обработки в потоке прокатного стана.

1. Так называемая предварительная обработка для высокоуглеродистых подшипниковых и инструментальных сталей. При этом используется гомогенизирующий нагрев, регулируемая и низкотемпературная прокатка, последующий сокращенный сфероидизирующий отжиг и дальнейшее изготовление изделий (подшипников, инструмента) и их стандартная термическая обработка у потребителя.

2. Окончательная обработка проката в потоке стана без термической обработки деталей у потребителя.

Совмещенная деформационно-термическая обработка проката существенно сокращает и ускоряет процессы дальнейшего передела стали за счет реализации структурных эффектов в сравнении с традиционной термической обработкой с отдельного нагрева [7, 8].

Структурные эффекты связаны с особым состоянием горячедеформированного аустенита по размеру зерна, дислокационной структуре, распределением карбидной фазы и его влиянием на кинетику фазовых и структурных превращений при прокатке и последующем охлаждении [7, 8]. Оптимизация микроструктуры обеспечивается при регулируемой (по температуре, степени и скорости) горячей деформации с последующим ускоренным или замедленным охлаждением в сочетании с оптимальными режимами термической обработки.

На коррозионностойких и конструкционных сталях подтверждены предположения М. Л. Бернштейна [7], что в деформированном при 1050 – 1150 °С аустените происходит термическая дестабилизация мелкодисперсных и пленочных фаз, перераспределение вредных примесей (фосфора, серы); обеспечивается очищение границ зерен в ходе высокотемпературной аустенитизации при нагреве под горячую прокатку, а также границ рекристаллизованных зерен. Это позволило, например, существенно повысить вязкость разрушения мартенсита и трещиностойкость конструкционных сталей, поперечную ударную вязкость аустенита коррозионностойких сталей.

Термическая обработка специальных сталей и сплавов в потоке сортопрокатных станов имеет свои особенности и проблемы по сравнению со сталями общего назначения. Это связано с большим различием химического состава, кинетики структурных и фазовых превращений в специальных сталях, широким диапазоном требований к термической обработке, свойствам и микроструктуре готовых изделий.

Для сталей общего назначения (например, арматурной стали) на действующих станах реализована

Таблица 1. Перспективные виды совмещенной деформационно-термической обработки проката специальных сталей

| Группа сталей | Основные марки сталей | Совмещенная деформационно-термическая обработка | Традиционная термическая обработка |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Конструкционные качественные легированные | 15X, 30X, 30X2H2M, 12XH3A, 30XГСА, 50XM, 17Г1С | Термоулучшение с прокатного нагрева с использованием регулируемой прокатки, подстуживания, закалки и отпуска в линии стана Нормализация с прокатного нагрева | Отдельная операция закалки и отпуска (термоулучшение) в термическом цехе Нормализация в термическом цехе |
| Коррозионно-стойкие | 12X18H10T, 10X17H13M2T, 08X13, 40X13 | Деформационно-термическая обработка в потоке стана с использованием регулируемой прокатки, регулируемого ускоренного охлаждения для сталей с повышенными требованиями по пределу текучести. Закалка с использованием непосредственно после прокатки подогрева до температур закалки и последующее охлаждение в линии стана | Отдельная закалка в печах и ваннах термических и кузнечных цехов |
| Подшипниковые (в том числе коррозионностойкие, теплостойкие повышенного качества) | ШХ15, ШХ4, ШХ15СГ, ШХ15-ШД, 95X18, 8X4M4B2Ф1-Ш (ДИ 43-Ш), 8X4B9Ф2-Ш (ЭИ 347-Ш) | Совмещенная деформационно-термическая обработка с использованием гомогенизирующего нагрева, регулируемой прокатки, промежуточного ускоренного охлаждения, низкотемпературной прокатки (в том числе с прерванным конечным охлаждением) и последующего сокращенного сфероидизирующего отжига проката или подката под калибровку в печах на участке прокатного цеха | Нагрев и прокатка заготовки, промежуточное ускоренное охлаждение, конечное охлаждение раската на воздухе; последующий сфероидизирующий отжиг с отдельного нагрева в термическом и термокалибровочном цехах |
| Инструментальные | X, 7XФ, XB4Ф, 9X1, XBГ, X12, X12MФ, X6BФ, 9X5BФ, 8X4B2MФC2, 5XHM, 4X5MФ1C, 3X2B8Ф, 6XBГ, P9, P6M5, P9K5 | | |

только самая простая схема — закалка в имеющихся охлаждающих устройствах в линиях прокатки. Для каждого вида металлопродукции из специальных сталей (прутки, полоса, мотки, катанка, калиброванный прокат, поставляемые с разной термической обработкой) требуется разработка соответствующей технологии на прокатном стане — нагрев, прокатка, последовательное охлаждение, отпуск, отжиг при дальнейшем переделе — правке, калибровке, термической обработке, отделке и др. Для специальных сталей концепция совмещенной деформационно-термической обработки может быть осуществлена благодаря использованию принципа модульных технологий, которые с успехом применяются в последнее время [9]. Основой для выбора деформационных и термических режимов сквозной энергосберегающей технологии являются соответствующие кинетические диаграммы структурообразования и фазовых превращений при горячей деформации и охлаждении.

В институте УкрНИИ Спецсталь исследованы кинетика и структура рекристаллизации горячедеформированного аустенита, их влияние на фазовые превращения и свойства проката специальных сталей и сплавов после регулируемого охлаждения и термической обработки [10, 11]. Построены диаграммы кинетики рекристаллизации горячедеформированного аустенита для основных 12 марок четырех групп специальных сталей и сплавов — конструкционных, коррозионно-стойких, подшипниковых, жаропрочных. Диаграммы кинетики рекристаллизации эффективно использовали при выборе параметров прокатки, обеспечивающих получение мелкозернистой (8 — 15 мкм) и однородной ультрамелкой (0,8 — 1,5 мкм) структуры аустенита [10, 11], а также при разработке режимов закалки корро-

зионностойких сталей в потоке прокатных станов 280, 325, 550 и 1050/950 ПАО «Днепропетросталь» [1, 2].

При использовании совмещенных диаграмм кинетики рекристаллизации, выделения избыточных карбидов и диаграмм $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения при охлаждении горячедеформированного аустенита высокоуглеродистых подшипниковых и инструментальных сталей удастся достичь (при ускоренном охлаждении после прокатки) измельчения аустенитного зерна, карбидов, уменьшения карбидной сетки [3 — 5]. Последнее происходит за счет достаточно большой плотности дислокаций в мелкозернистом динамически рекристаллизованном и наклепанном в конце низкотемпературной прокатки аустените.

Перспективная технология совмещенной деформационно-термической обработки подшипниковых сталей включает гомогенизирующей нагрев заготовки, регулируемую прокатку с промежуточным ускоренным охлаждением, низкотемпературную прокатку (в том числе с прерванным конечным охлаждением), сокращенный сфероидизирующий отжиг проката или подката для калибровки [3 — 5].

Нормализацию с прокатного нагрева легированных конструкционных сталей проводят с использованием регулируемой прокатки и последующего охлаждения раската на воздухе [1, 3, 6, 10]. Для легированных конструкционных сталей с термоулучшением способ совмещенной деформационно-термической обработки включает регулируемую прокатку с ускоренным последовательным охлаждением и получением бейнитной или мартенситной структуры в установках ускоренного охлаждения сортовых станов и отпуск в камерных газовых печах при стандартных (согласно ГОСТам, EN) температурах [1, 3].

Для коррозионно-стойких сталей с закалкой с про-

катного нагрева оптимальным решением является подогрев металла после деформации до температур закалки с последующим охлаждением в линии стана. При этом выполняются требования современных стандартов к температуре нагрева под закалку, обеспечивается необходимое состояние высокотемпературного аустенита и, соответственно, конечная микроструктура. Однако при прокатке аустенитных сталей происходит значительный деформационный разогрев металла при незначительных потерях тепла излучением, конвекцией и теплопроводностью из-за низкой теплопроводности таких сталей. Это обстоятельство позволяет обеспечивать температуру конца прокатки ≥ 1050 °С и достаточную степень собирательной рекристаллизации до размера аустенитного зерна номер 5 – 6 по ГОСТ 5639–82 после окончания деформации, чтобы после ускоренного последеформационного охлаждения проката получать механические свойства в состоянии поставки на уровне закаленных образцов по ГОСТ 5949–75. Повышение температуры конца прокатки достигается за счет повышения температуры нагрева заготовок перед прокаткой, увеличением скорости прокатки и степени единичных обжатий по проходам.

Используя указанные технологические приемы, в условиях ПАО «Днепроспецсталь» при производстве проката diam. от 8 до 230 мм реализован процесс закалки аустенитных коррозионностойких сталей в потоке всех прокатных станов [1, 2]: 280 (diam. 8 – 22 мм), 325 (diam. 22 – 42 мм), 550 (diam. 44 – 130 мм) и 1050/950 (diam. 135 – 230 мм).

Для увеличения объемов производства закаленного проката diam. ≥ 130 мм из аустенитных сталей в потоке стана 1050/950 установлено закалочное устройство, обеспечивающее закалку прутков в проточной воде из оборотного цикла. Технология закалки проката в потоке обжимно-заготовочного стана предусматривает прокатку с температурой конца деформации 1050 – 1100 °С, резку раската и ускоренное последеформационное охлаждение в воде с активным барботированием в течение 10 – 15 мин. В момент выгрузки закаленных прутков diam. 135 – 230 мм из закалочной ванны поверхность металла не имеет свечения. Данная технология позволила исключить закалку проката из коррозионностойких сталей с отдельного нагрева, стабилизировать показатели качества металла и значительно увеличить объемы производства закаленного проката.

Для проверки воспроизводимости и надежности технологии рассчитали коэффициент воспроизводимости $C_{п.к}$. Если показатель качества имеет нижнюю нормативную границу, коэффициент $C_{п.к}$ рассчитывали по формуле:

$$C_{п.к} = (X - НГ)/3\sigma, \quad (1)$$

где X – среднее значение показателя качества; $НГ$ – нижняя граница допустимых значений показателя качества; σ – среднеквадратичное отклонение.

Если показатель качества имеет и верхнюю нормативную границу, то значения $C_{п.к}$ вычисляли по формуле:

$$C_{п.к} = (ВГ - X)/3\sigma, \quad (2)$$

где $ВГ$ – верхняя граница допустимых значений показателя качества. Затем из двух значений, вычисленных по формулам (1) и (2), выбирали минимальное, которое является коэффициентом воспроизводимости процесса. При этом процесс считается стабильным, контролируемым и управляемым, если $C_{п.к} > 1,0$. Если $1,0 > C_{п.к} > 0,67$, процесс производства стабильный, но требуется дополнительный анализ и возможная корректировка. При $C_{п.к} < 0,67$ процесс считается нестабильным и неконтролируемым.

На основании рассчитанных значений $C_{п.к}$ сделали вывод, что технология закалки проката коррозионностойких аустенитных сталей в потоке обжимно-заготовочного стана 1050/950 фактически обеспечивает стабильность всех характеристик механических свойств сталей 03X17H13M2 и 08X17H13M2T, но для достижения некоторых свойств ряда сталей требуется дополнительный анализ и возможная корректировка.

Стан 550 также оснащен измерительной аппаратурой для управления температурными условиями прокатки и последеформационного охлаждения металла. Благодаря этому на стане 550 внедрена технология прокатки коррозионностойких аустенитных сталей 03X17H13M2T, 08X17H13M2, 07X18H10, 08X18H10T и др., обеспечивающая получение структуры, механических свойств и стойкости против межкристаллитной коррозии в состоянии поставки на уровне закаленных образцов по ГОСТ 5949.

Для сталей, стабилизированных титаном, обеспечили температуру конца прокатки 1020 – 1100 °С, для сталей, не стабилизированных титаном, – 1000 – 1080 °С. Ускоренное последеформационное охлаждение проката diam. от 44 до 130 мм выполняли под аэраторами в потоке стана 550. В результате проведенных разработок удалось исключить закалку прутков с отдельного нагрева. Закалка низкоуглеродистых аустенитных сталей, не стабилизированных титаном, позволила получить более равномерную структуру по сечению профиля, чем закалка с отдельного нагрева. Кроме того, закалка с прокатного нагрева не требует больших степеней холодной деформации при правке, что благоприятно сказывается на антикоррозионных свойствах стали.

Качество технологического процесса закалки аустенитных сталей в потоке стана 550 оценивали путем расчета коэффициента воспроизводимости $C_{п.к}$ по приведенной выше методике. Сравнивая качество двух процессов закалки проката из стали 08X17H13M2T на станах 1050/950 и 550 по значению коэффициента воспроизводимости, установили, что технология последеформационной закалки в воде на стане 1050/950 более надежна и обеспечивает большую стабильность показателей качества. Последеформационное охлаждение проката из стали 08X17H13M2T в воде обеспечивает более высокие прочностные характеристики по сравнению с охлаждением под аэраторами, несмотря на большую суммарную степень деформации (уков) металла, прокатанного на стане 550. Водяное охлаждение повышает пределы текучести $\sigma_{0,2}$ и σ_1 в среднем на 28 и 24 МПа (на 10,5 и 8 %) соответственно.

Таблица 2. Механические свойства улучшенного проката

| Сталь | Диаметр профиля, мм | Предел прочности, Н/мм ² | $\sigma_{0,2}$, Н/мм ² | δ_5 , % | ψ , % | KCU, Дж/см ² | KCV, Дж/см ² |
|----------------------------|---------------------|-------------------------------------|------------------------------------|----------------|--------------|-------------------------|-------------------------|
| 14X17H2Б* | 17 – 30/18 – 24 | ≥ 931/990 – 1080 | ≥ 784/835 – 935 | ≥ 10/16 – 24 | ≥ 50/62 – 69 | ≥ 78/91 – 133 | —/— |
| 14X17H2* | 17 – 30/18 – 25 | ≥ 931/933 – 1044 | ≥ 784/785 – 938 | ≥ 10/18,5 – 21 | ≥ 50/54 – 65 | ≥ 78/85 – 112 | —/— |
| 20X17H2 | ≤ 60 | 800 – 950 | ≥ 600 | ≥ 14 | — | — | ≥ 25 |
| | 60 – 160 | 800 – 950 | ≥ 600 | ≥ 12 | — | — | ≥ 20 |
| | 160 – 190 | 800 – 950 | ≥ 550 | ≥ 5** | — | — | — |
| 20X13 | ≤ 60 | 800 – 900 | ≥ 600 | ≥ 14 | — | — | ≥ 20 |
| | 60 – 160 | 800 – 950 | ≥ 600 | ≥ 12 | — | — | ≥ 20 |
| | 160 – 230 | 800 – 950 | ≥ 600 | ≥ 8** | — | — | — |
| 20X13 | 100 – 180 | ≥ 635 | ≥ 540 | ≥ 10 | ≥ 45 | 49 | — |
| 13X11H2B2MФ-Ш (ЭИ961-Ш) | 65 – 160 | — | ≥ 735 | — | — | 20 при – 20 °С | — |

* Приведены требования ГОСТ (числитель) и полученные данные (знаменатель).

** В поперечном направлении.

Для обеспечения режима закалки мелкосортного проката из аустенитных сталей с прокатного нагрева, для реализации контролируемой прокатки с регламентируемыми температурными параметрами деформации и последеформационного охлаждения конструкционных и инструментальных сталей, жаропрочных сталей и сплавов на мелкосортных станах 280 и 325 имеются контрольно-измерительные приборы. Эти станы снабжены установками ускоренного последеформационного охлаждения, в которых происходит глубокое охлаждение проката. Установка на стане 325 длиной 21 м позволяет охлаждать прокат диам. 22 – 42 мм до 600 °С и ниже при скорости прокатки 4 – 7 м/с и расходе воды до 240 м³/ч.

На стане 280 имеются две установки ускоренного последеформационного охлаждения: одна работает на холодильник при прокатке прутков диам. от 14 до 22 мм, другая — на моталки при производстве бунтового проката диам. от 8 до 13 мм. Обе установки обеспечивают охлаждение проката до 600 °С и ниже при скорости прокатки от 4 до 8 м/с (на моталки) и от 5,5 до 8 м/с (на холодильник). Максимальный расход воды для бунтовой стали составляет 70 м³/ч, для прутковой — 140 м³/ч.

Все установки на мелкосортных станах снабжены ультразвуковыми расходомерами для обеспечения и контроля требуемой скорости последеформационного охлаждения и, следовательно, температуры окончания охлаждения в зависимости от размера профиля, скорости прокатки. В зависимости от требований к структуре металла и механическим свойствам задают режим охлаждения проката. При этом закалке можно подвергать стали не только аустенитного класса, но и ферритного, мартенситно-ферритного, аустенитно-ферритного и аустенитно-мартенситного классов.

Совместно с УкрНИИспецсталью в условиях ПАО “Днепропетросталь” разработана технология получения термоупрочненного проката коррозионностойких сталей 08-12X18H10T, 12X18H10T-ВД, 10X17H13M2T. Используя эффект термомеханической обработки, на стане 325 получили прокат с пределом текучести, в два раза большим норм ГОСТ 5949, и с пределом прочности выше стандартных норм на 20 %. При этом отно-

сительное удлинение и относительное сужение соответствуют требованиям ГОСТ 5949.

Значительно расширяет возможности термомеханической обработки наличие на заводе разнообразных термических средств для отпуска закаленных мартенситных сталей, а также средств для холодного волочения подката. Имея такое сочетание оборудования, можно создать любой комплекс механических и других служебных свойств металла. Примером таких работ стало освоение производства проката из ферритно-мартенситной стали 14X17H2Б для погружных насосов и из мартенситных сталей 20X17H2, 17X16H2, 20X13 и 13X11H2B2MФ-Ш (ЭИ961-Ш) с термическим улучшением (табл. 2), включающим закалку и высокий отпуск.

Осваивая новую технологию улучшения проката из мартенситных и мартенситно-ферритных сталей, решали задачу получения необходимого уровня механических свойств, не допуская образования трещин напряжения вследствие неравномерности мартенситного превращения по сечению профиля. Определены оптимальные режимы последеформационного охлаждения и последующего высокого отпуска мартенситных сталей в зависимости от требуемых механических свойств и размеров профиля. С целью оптимизации технологии исследовали фазовые превращения сталей 20X17H2, 17X16H2, 14X17H2Б на дилатометре DL-7000 (Япония), установленном на ПАО “Днепропетросталь”. Для различных скоростей нагрева определены критические точки A_{c1} и A_{c3} и для различных скоростей охлаждения — температуры начала (числитель) и окончания (знаменатель) мартенситного превращения (табл. 3).

Для уменьшения себестоимости металлопродукции, сокращения цикла производства и повышения конкурентоспособности разработана и освоена технология прокатки слитков из сталей 20X17H2 и 17X16H2 на сортовые профили диам. от 135 до 200 мм взаменковки с последующим улучшением. Для исключения брака по трещинам напряжения значительно уменьшили скорость последеформационного проката, особенно при температурах превращения аустенита в мартенсит (от 350 до 120 °С). Также изменили регламент посадки закаленных прутков в термические печи

Таблица 3. Критические точки при нагреве и охлаждении сталей 20X17H2, 17X16H2 и 14X17H2Б

| Сталь | Скорость нагрева, °С/мин | Температура нагрева, °С | A_{c1} | A_{c1} | Скорость охлаждения, °С | Температура мартенситного превращения, °С |
|----------|--------------------------|-------------------------|----------|----------|-------------------------|-------------------------------------------|
| 20X17H2 | 5 | 870 | 750 | 805 | 5 | 340/125 |
| | 10 | 900 | 750 | 830 | 10 | 305/100 |
| | 30 | 1000 | 820 | 850 | 30 | 280/100 |
| | 50 | 950 | 860 | 890 | 50 | 215/60 |
| | 80 | 1000 | 910 | 935 | 100 | 200/— |
| | 100 | 1000 | 935 | 960 | 100 | 190/60 |
| 17X16H2 | 5 | 890 | 745 | 785 | 5 | 345/205 |
| | 10 | 890 | 760 | 800 | 10 | 325/155 |
| | 20 | 910 | 800 | 830 | 20 | 245/60 |
| | 30 | 910 | 820 | 855 | 30 | 215/60 |
| | 50 | 950 | 830 | 880 | 50 | 180/35 |
| | 80 | 1000 | 860 | 915 | 100 | 180/25 |
| 14X17H2Б | 100 | 1000 | 940 | 950 | 100 | 180/25 |
| | 5 | 1000 | 720 | 750 | 5 | 250/70 |
| | 10 | 1000 | 725 | 775 | 10 | 250/70 |
| | 20 | 1000 | 765 | 800 | 20 | 205/65 |
| | 30 | 1000 | 770 | 825 | 30 | 200/65 |
| | 50 | 1000 | 810 | 850 | 50 | 115/40 |
| | 80 | 1000 | 830 | 870 | 100 | —/— |

на высокий отпуск. Получены положительные результаты: несмотря на повышенную уширяемость стали, катаные круглые профили имеют правильную форму; структура и механические свойства соответствуют требованиям нормативной документации (см. табл. 2).

Оснащение прокатных станов аппаратурой для измерения температуры металла в процессе прокатки и последеформационного охлаждения, а также имеющиеся условия для ее регулировки позволяют проводить нормализацию конструкционных сталей с прокатного нагрева, обеспечивая механические свойства проката на уровне требований к нормализованным пруткам с отдельного нагрева. Некоторые стандарты, например DIN 17100, допускают проведение нормализации с прокатного нагрева. Поэтому в условиях ПАО “Днепрспецсталь” на стане 550 исследовали возможность нормализации проката в потоке стана без дополнительного нагрева. В результате проведенных экспериментов установлено, что для сталей 20, 17Г1С, 18Г, 16ХГ определяющими факторами, обеспечивающими получение механических свойств и ударной вязкости на уровне нормализованного состояния, являются температура конца деформации и скорость последеформационного охлаждения, т. е. условия окончания деформации должны гарантировать однофазное аустенитное состояние металла перед последним проходом и размер аустенитных зерен перед фазовым $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращением должен быть от № 7 до № 9 по ГОСТ 5639 – 82.

Установлено, что повышение температуры конца прокатки от 880 до 950 °С для прутков диам. 44 – 130 мм из сталей 20, 17Г1С, 18Г, 16ХГ не приводит к значительным изменениям механических свойств после охлаждения на воздухе, которые соответствуют требованиям для нормализованного проката. Данные результаты позволяют исключить из технологической схемы операцию нагрева указанного выше проката под нормализацию и гарантировать получение требуемых показателей качества.

Проведенные исследования показали, что нормализующая прокатка для обеспечения регламентированных механических свойств в состоянии поставки позволяет значительно уменьшить затраты на термическую обработку и ее необходимо расширить на весь марочный и профильный сортамент проката из специальных сталей.

Таким образом, современные научные и технологические разработки, реализованные в условиях ПАО “Днепрспецсталь”, а также опыт других металлургических предприятий [6] подтверждают возможность высокоэффективной замены термической обработки с отдельного нагрева на совмещенную деформационно-термическую обработку. При этом используется тепло прокатного нагрева и улучшается качество стали по микроструктуре и механическим свойствам, что не только удовлетворяет потребности отечественной экономики по стоимости и качеству, но и обеспечивает конкурентоспособность экспортируемой металлопродукции.

Совмещенная деформационно-термическая обработка в странах СНГ частично реализована для проката из конструкционных сталей с нормализацией и термоулучшением, коррозионноустойчивых сталей с закалкой на средне- и мелкосортных прокатных станах России (Златоустовский металлургический комбинат), Белоруссии (БМЗ, г. Жлобин), Молдовы (ММЗ, г. Рыбница).

С целью внедрения сквозной технологии и получения конкурентоспособной продукции из легированных конструкционных, подшипниковых (в том числе теплостойких для авиации), коррозионноустойчивых сталей с улучшенными физико-механическими свойствами разработаны технологические схемы, определен состав и план размещения оборудования, на основе которых совместно с ГП “Гипропром” и ПАО “Днепрспецсталь” разработаны рекомендации по проектированию, дооснащению и реконструкции прокатно-термического производства специальных сталей, в том числе по созданию новых модульных линий.

Библиографический список

1. Панченко А. И., Тумко А. Н., Логозинский И. Н., Сальников А. С., Левия Б. А. Совмещение прокатки и термической обработки специальных сталей в условиях ПАО “Днепроспецсталь” // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2012. № 7. С. 284 – 288.
2. Логозинский И. Н., Тумко А. Н., Сальников А. С. Расширение профильного и марочного сортамента проката и поковок из коррозионноустойчивых и жаропрочных сталей и сплавов // *Сталь*. 2006. № 11. С. 128 – 130.
3. Спектор Я. И., Пригунова А. Г., Яценко Ю. В., Куницкая И. Н. Эффекты термомеханической обработки проката подшипниковой стали // *Сталь*. 2006. № 3. С. 79 – 82.
4. А. с. 1401061 (СССР). Способ обработки углеродистых сталей / В. Т. Жадан, В. А. Трусов, А. Н. Тумко и др.; заявл. 02.06.1986; опубл. 1988, Бюл. № 21.
5. Ярошенко О. А., Тумко А. Н., Лобов А. И. Уменьшение остатков карбидной сетки в прокате стали ШХ15(СГ) // *Сталь*. 2002. № 9. С. 82 – 83.
6. Черненко А. Н. Опыт использования ресурсосберегающей технологии производства проката с регламентированными свойствами // *Сталь*. 2002. № 5. С. 51 – 55.
7. Бернштейн М. Л., Спектор Я. И., Дегтярев В. Н. Влияние температуры аустенитизации и горячей деформации на структуру и механические свойства стали 40ХН2МА // *Физика металлов и металловедение*. 1982. Т. 53, № 1. С. 68 – 75.
8. Яценко Ю. В., Спектор Я. И. Влияние состояния аустенита на кинетику перлитного превращения и морфологию перлита // *Изв. АН СССР. Металлы*. 1986. № 2. С. 106.
9. Стеблов А. Б. Модульный принцип строительства металлургических мини-заводов // *Сталь*. 2010. № 12. С. 50 – 53.
10. Спектор Я. И., Куницкая И. Н., Яценко Р. В., Тумко А. Н. Термокинетические диаграммы рекристаллизации аустенита при горячей прокатке специальных сталей // *МиТОМ*. 2008. № 7. С. 6 – 9.
11. Куницкая И. Н., Спектор Я. И., Ольшанецкий В. Е. Структурные и кинетические особенности динамической рекристаллизации легированного аустенита при многопроходной горячей деформации // *МиТОМ*. 2011. № 10. С. 39 – 42.

УДК 669.14.018.25:621.784.82

Исследование влияния гомогенизации слитков на работу удара в прокате из стали 4Х5МФС

О. В. Пересащенко, И. Н. Логозинский, С. Б. Никитин, И. А. Смолий, Н. А. Маренков*
 ПАО “Днепроспецсталь”
 (г. Запорожье, Украина)

С целью получения в поперечном направлении вакуумированного проката из стали 4ХМФС (I.2343/H11) при постоянной степени укова работы удара ≥ 200 Дж откорректированы режимы гомогенизации слитков и последеформационного охлаждения сорта. Установлено, что увеличение времени выдержки при гомогенизации позволяет уменьшить ликвацию в металле, а применение подстуживания проката перед замедленным охлаждением — избежать образования карбидной сетки в микроструктуре. Уровень работы удара по всему сечению металлопродукции диам. 165 – 190 мм удовлетворяет требованиям спецификации фирмы “Bohler” и составляет > 200 Дж.

Ключевые слова: прокат, работа удара, гомогенизация, ликвация, уков, выдержка.

Инструментальные Cr – Mo – V – Si-стали для горячей обработки деталей из легких сплавов используются для изготовления пресс-форм для литья под давлением, пуансонов для экструзии, дорнов, штамповочных вставок и т. д. Непрерывность производственного цикла и экономическая эффективность предприятия во многом зависят от срока службы используемого инструмента. Инструмент ответственного назначения эксплуатируется в жестких условиях с различными нагрузками, поэтому к его качеству и соответственно к качеству применяемой стали предъявляются повышенные требования. Для увеличения стойкости инструмента сталь должна обладать определенными свойствами — высокой вязкостью, теплостойкостью, сопротивлением термической усталости. Специальные требования к качеству металлопродукции из Cr – Mo – V – Si-сталей разработаны ассоциацией зарубежных фирм, эксплуатирующих горячештамповую оснастку.

Для повышения класса металлопродукции до уровня мировых стандартов на заводе “Днепроспецсталь” проводится работа по анализу факторов, влияющих на качество изделий, для совершенствования технологии производства.

Ранее действующая технология производства проката из стали 4Х5МФС(1)С, обеспечивающая выполнение требований ГОСТ 5950–73, включала: выплавку, вакуумирование, сифонную разливку стали в изложницы с получением слитков массой 3,7 т; их гомогенизацию, совмещенную с нагревом под прокатку на обжимно-

заготовочном стане 1050/950 на заготовки квадратного сечения 130 – 185 мм или сорт диам. 127 – 190 мм с последующим замедленным охлаждением, прокатку заготовок на сорт диам. 45 – 130 мм на крупносортном стане 550; охлаждение сортового проката в неотопляемых колодцах и передачу его на отжиг при 890 °С.

В связи с повышенным числом случаев неудовлетворительной микроструктуры после отжига проката при оценке по шкалам стандартов NADCA и SEP1614 во избежание образования карбидной сетки и грубоигольчатой структуры металла замедленное охлаждение штанг на выходе со стана 550 было заменено на ускоренное [1].

Для определения соответствия металлопродукции текущего производства требованиям спецификации фирмы “Bohler” проведены испытания на работу удара образцов по SEP 1314 после закалки и двойного отпуска на твердость $HRC 45 \pm 2$ [2]. По результатам исследований сделаны выводы, что ориентация микроструктуры после отжига металла не имеет определяющего влияния на работу удара после окончательной термической обработки (закалка + двойной отпуск); основное влияние оказывают величина укова, интенсивность развития структурной полосчатости и наличие карбидной сетки в микроструктуре металла.

Известно [3], что с увеличением концентрации карбидообразующих элементов в штамповых сталях

* В работе принимали участие И. В. Таранец, Ю. В. Роговская, И. Н. Курцова, В. Э. Хлебко.

Результаты механических испытаний проката из стали 4X5MФC в поперечном направлении после термической обработки на твердость $HRC 45 \pm 2$ (закалка + двойной отпуск) после различных режимов гомогенизации при $> 1200 \text{ }^\circ\text{C}$

| Диаметр, мм | Степень укова от сечения слитка и диаметра круга | Штанга | Работа удара, Дж, на расстоянии от поверхности | | |
|------------------------------------|--------------------------------------------------|--------|------------------------------------------------|---------------|---------------|
| | | | 12,5 мм | 1/2 радиуса | центр |
| Гомогенизация слитков 6 ч | | | | | |
| 170 | 11,9 | 1 | 174 – 237/213 | 178 – 251/209 | 179 – 210/190 |
| 185 | 10,1 | 1 | 210 – 256/236 | 171 – 211/185 | 180 – 198/188 |
| Гомогенизация слитков 10 ч | | | | | |
| 165 | 12,6 | 1 | 205 – 238/227 | 195 – 229/207 | 194 – 237/220 |
| | | 2 | 215 – 254/241 | 219 – 278/241 | 255 – 272/262 |
| Гомогенизация слитков > 10 ч | | | | | |
| 185 | 10,1 | 1 | 262 – 287/278 | 241 – 259/250 | 240 – 265/253 |
| Требование зарубежных потребителей | | | ≥ 200 | ≥ 200 | — |

возрастает теплостойкость, при этом отмечается снижение ударной вязкости в заготовках сечением > 150 мм, что связано с возрастанием неоднородности свойств по сечению вследствие ликвационных процессов при кристаллизации. Благодаря увеличению степени укова слитка путем горячей деформации, сильно облегчающей диффузию, ликвация может устраняться настолько, что больше не оказывает отрицательного влияния на механические свойства стали.

Таким образом, для получения в поперечном направлении вакуумированного проката при постоянной степени укова диам. 165 – 190 мм работы удара ≥ 200 Дж корректируется режим гомогенизации слитков. Для исключения образования карбидной сетки в микроструктуре металла применяется подстуживание сорта на воздухе с температуры конца деформации перед замедленным охлаждением в колодцах.

Испытания на ударный изгиб проводили в поперечном направлении по сечению штанг после отжига на трех образцах без надреза $7 \times 10 \times 55$ мм по SEP 1314, термически обработанных на твердость $HRC 45 \pm 2$. Прокат, произведенный по базовой технологии с выдержкой слитков при температуре гомогенизации 6 ч, показал предельно допустимые значения работы удара или ниже требований зарубежных потребителей (таблица). При увеличении выдержки > 6 ч средние значения удара по всему сечению штанг превышают 200 Дж (см. таблицу), однако наблюдается несоответствие результатов испытаний отдельных образцов указанной норме. Визуально при оценке по шкале SEP 1614 значительных различий в интенсивности развития структурной полосчатости отожженного металла после различной выдержки при температуре гомогенизации не обнаружено. Исходя из этого, с целью большего снижения ликвационных явлений время выдержки слитков увеличили > 10 ч. Вследствие проведения данной термической обработки средний уровень работы удара проката с уковом 10,1 составляет ≥ 250 Дж, что превосходит заявленные требования. Необходимо отметить, что полученные значения отличаются постоянством по всему сечению штанг, единичных несоответствий не наблюдается. Кроме того, структурная полосчатость исследуемого металла после отжига характеризуется значительно меньшей контрастностью, карбидной сетки в его микроструктуре не выявлено.

Установлено, что увеличение длительности выдер-

жки при гомогенизации слитков стали 4X5MФC (1.2343/H11) свыше 10 ч при постоянной степени укова проката диам. 165 – 190 мм, а также применение подстуживания с температуры конца деформации перед замедленным охлаждением позволяет уменьшить ликвацию, а также избежать образования карбидной сетки в металле. Благодаря этому уровень работы удара в поперечном направлении проката из вакуумированной стали удовлетворяет требованиям спецификации фирмы “Bohler” и составляет > 200 Дж.

Для оптимизации длительности выдержки при температуре гомогенизации и анализа процессов, протекающих при производстве металлопродукции, ведутся исследования при изломах и микроструктуры образцов после испытаний на ударный изгиб.

Для повышения конкурентоспособности предприятия и расширения рынка сбыта инструментальных сталей для горячей обработки деталей проводится работа, направленная на соответствие проката из сталей 4X5MФC (1.2343/H11) и 4X5MФ1C (1.2344/H13) текущего производства американскому стандарту NADCA, который имеет ряд отличий от требований европейских потребителей.

Выводы. 1. Увеличение длительности выдержки при гомогенизации слитков из стали 4X5MФC > 10 с при постоянной степени укова металла позволяет уменьшить ликвацию в его структуре.

2. Образования карбидной сетки в прокате диам. 165 – 190 мм можно избежать с помощью подстуживания с температуры конца деформации перед замедленным охлаждением.

3. Полученные результаты свидетельствуют, что повышение работы удара в прокате из стали 4X5MФC при постоянной степени деформации можно достичь за счет снижения ликвационных явлений и исключения выделения карбидной фазы по границам зерен.

Библиографический список

1. Совершенствование технологии производства проката диам. 45 – 130 мм из стали 4X5MФ(1)C / О. В. Пересаденко, И. П. Волчок, А. С. Сальников и др. // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. трудов. Вып. 58. — Днепропетровск : ПГАСА, 2011. С. 541 – 544.
2. Определение факторов, влияющих на работу удара инструментальных Cr – Mo – V – (Si)-сталей / О. В. Пересаденко, И. П. Волчок // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. трудов. Вып. 64. — Днепропетровск : ПГАСА, 2012. С. 103 – 106.
3. Инструментальные стали : справочник / Л. А. Позняк, С. И. Тишарев, Ю. М. Скрынченко и др. — М. : Металлургия, 1977. — 168 с.

Экспериментальное исследование процесса протяжки углеродистой стали

В. Л. Чухлеб, А. Н. Тумко,
А. В. Ашкелянец, О. А. Ярошенко
ПАО «Днепроспецсталь»
(г. Запорожье, Украина)

В лабораторном эксперименте исследовано влияние относительной подачи, укова и схемы кантовки при протяжке на механические свойства углеродистой стали. Построены регрессионные зависимости механических свойств от технологических параметров ковки методом протяжки. Увеличение укова приводит к повышению прочностных свойств и уменьшению пластичности. Схема кантовки не влияет на механические свойства, с увеличением относительной подачи возрастает относительное сужение.

Ключевые слова: ковка, протяжка, уков, относительная подача, механические свойства, молот, кантовка.

Протяжка является сложной операцией свободнойковки, поскольку она проводится путем последовательных обжатий, осуществляемых на смежных участках заготовки с подачей. Операция протяжки усложняется, если между обжатиями и проходами применяют кантовку заготовки на некоторый угол. Последовательные обжатия по длине заготовки обуславливают наличие внешних зон, которые в свою очередь вносят дополнительные растягивающие напряжения. Угол кантовки влияет на качество металла в центральной зоне поковки. Для осуществления технологического процесса необходимо знать оптимальные параметры его проведения, относительно операции протяжки необходимо знать величину относительной подачи для ведения процесса, какую форму бойков при этом использовать, какую деформацию необходимо производить за одно обжатие и т. д.

Не менее важным является изучение влияния одних параметров операции на другие. Каждый технологический процесс зависит от нескольких факторов, таких как температуры начала и концаковки, скорость и степень деформации, материал заготовки, форма инструмента и др., каждый из которых по-своему влияет на качество готового изделия. Все эти факторы изучались раньше и изучаются сейчас разными методами: с помощью математического моделирования и непосредственно при проведении экспериментов. Для исследования операции протяжки проведено немало работ, в которых изучены: распределение деформаций при протяжке крупных поковок, влияние относительной подачи и степени деформации на проработку центральной зоны поковки; процессы протяжки с продольным сдвигом; опасные стадииковки, при достижении которых качество поковки ухудшается; распределение укова по объему поковки при разных схемахковки; влияние укова на механические свойства [1 – 7]. Практически во всех работах рассматривали только те параметры, изменение которых по отдельности приводило к улучшению тех или других показателей процесса, поэтому исследование отдельной технологии, а именно влияния совокупности факторов при их варьировании в некоторых пределах в

процессе осуществления этой технологии является целесообразным и актуальным на данный момент.

Перед составлением плана эксперимента должно быть определено, влияние каких факторов будет изучаться, в настоящей работе поставлена задача рассмотреть влияние укова, относительной подачи и схемы кантовки. Уков характеризует степень проработки металла, т. е. его качество. Качественная проработка металла предусматривает образование волокнистой структуры поковки по всему ее сечению. Значение укова, при котором волокнистая структура распространяется по всему сечению заготовки, в значительной степени зависит от марки стали, размеров заготовки и структуры металла.

Относительная подача, как правило, принимается максимально возможной для увеличения производительности, но при этом необходимо учитывать, что при обжатии металл не должен вытекать за границу ширины бойка. Исходя из этого, величину подачи рекомендуют принимать равной 0,4 – 0,7 от ширины верхнего бойка. Подача с большими величинами увеличивает неравномерность деформации, поэтому в настоящей работе исследовали именно рекомендованный интервал подач.

В исследовании реализован полный факторный эксперимент. Варьирование трех факторов проводили на двух уровнях: +1 и –1. Для формирования плана эксперимента необходимо задать предельные значения факторов, т. е. их уровни. В качестве независимых переменных выбрали: схему кантовки при протяжке – X_1 (схема *a* – протяжка “проходами”; схема *б* – протяжка кольцами), относительную подачу (X_2) и уков (X_3). Интервалы варьирования факторов и их значения в натуральном масштабе на основном, верхнем и нижнем уровнях приведены в табл. 1. План эксперимента в кодируемом и натуральном масштабах приведен в табл. 2.

Откликами эксперимента являлись пределы текучести (y_1) и прочности (y_2), относительные удлинение (y_3)

Таблица 1. Уровни факторов

| Факторы | X_1 | X_2 | X_3 |
|--------------------------------------|----------------|-------|-------|
| Основной уровень (X_0) | – | 0,55 | 2 |
| Интервал варьирования (ΔX) | – | 0,15 | 0,5 |
| Верхний уровень (+1) | Схема <i>a</i> | 0,7 | 2,5 |
| Нижний уровень (–1) | Схема <i>б</i> | 0,4 | 1,5 |

Таблица 2. План полного факторного эксперимента

| № опыта | Кодируемый масштаб | | | Натуральный масштаб | | |
|---------|--------------------|-------|-------|---------------------|-------|-------|
| | x_1 | x_2 | x_3 | X_1 , схема | X_2 | X_3 |
| 1 | + | + | + | <i>a</i> | 0,7 | 2,5 |
| 2 | – | + | + | <i>б</i> | 0,7 | 2,5 |
| 3 | – | – | + | <i>a</i> | 0,4 | 2,5 |
| 4 | – | – | + | <i>б</i> | 0,4 | 2,5 |
| 5 | + | + | – | <i>a</i> | 0,7 | 1,5 |
| 6 | – | + | – | <i>б</i> | 0,7 | 1,5 |
| 7 | + | – | – | <i>a</i> | 0,4 | 1,5 |
| 8 | – | – | – | <i>б</i> | 0,4 | 1,5 |

и сужение (y_4). Ковку проводили при высоких температурах (для разных сталей в пределах 750 – 1300 °С) [1]. Нагрев металла приводит к потере упругих свойств, уменьшению сопротивления деформации и увеличению пластичности. В процессе горячей обработки металла давлением напряжения снимаются за счет возврата, полигонизации и рекристаллизации металла. Кроме того, тепловое воздействие на металл наряду с пластической деформацией приводит к перекристаллизации и растворению карбидов, ускорению диффузии. Для уменьшения энергии деформации при ковке заготовку нагревают до максимально возможной температуры, которая определяется температурным интерваломковки по справочнику. Но вблизи температуры плавления наблюдается потеря пластичности, связанная с оплавлением и окислением границ зерен.

Заготовки, предназначенные для пластической деформации, нагревали в электропечи сопротивления. Пластическую деформацию осуществляли на пневматическом молоте с массой падающих частей 50 кг. Для проведения исследований отобрали 24 образца длиной 100 мм и поперечным сечением 20×20 мм. Были реализованы две схемыковки: *a* — протяжка “проходами”, выполняемая последовательными подачами и обжатиями поковки по всей ее длине без промежуточных кантовок (подача — обжатие — подача — обжатие и т. д.) и *b* — протяжка “кольцами”, т. е. обжатие поковки по периметру на заданный размер в одном каком-либо ее месте без промежуточных подач (обжатие — кантовка — обжатие — кантовка и т. д.).

Обе схемы предусматривали контроль определенных уровней относительной подачи и укова с помощью специального устройства, и обе включали большое количество переходов, поэтому рассмотрим в общем виде упрощенные схемыковки.

Протяжка проходами (*a*):

1) исходную заготовку нагревали в печи до 1200 °С, доставали клещами и закрепляли в специальном держателе, с помощью которого заготовку задавали под бойки на установленную величину абсолютной подачи;

2) первый переход: по заданной под бойки части заготовки несколько раз ударяли верхним бойком молота до высоты деформированной части заготовки;

3) второй переход: держатель заготовки передвигали на следующую отметку линейки, подавая заготовку таким образом на следующую величину абсолютной подачи, и заданную под бойки часть заготовки также обжимали по высоте ограничителя;

4) третий переход: держатель заготовок передвигали на следующую отметку линейки и заготовку задавали на последнюю величину абсолютной подачи на данной рабочей длине и опять деформировали;

5) после первого прохода поковку кантовали на 90°. Поскольку длина поковки увеличилась, то и количество абсолютных подач возросло. При кантовке ширина и высота поковки изменили свои размеры. По окончании первого перехода для получения требуемых размеров поковки проводят следующие переходы, при получении поковки необходимых размеров ее выни-

мали из держателя и выкладывали на асбестовый лист для охлаждения.

Протяжка кольцами (*b*):

1) исходную заготовку нагревали в печи до 1200 °С, доставали клещами и закрепляли в специальном держателе, с помощью которого заготовку задавали под бойки на установленную величину абсолютной подачи;

2) первый переход: по заданной под бойки части заготовки ударяли несколько раз верхним бойком молота до требуемой высоты деформированной части заготовки, установленной по ограничителю;

3) продолжение первого перехода: поковку кантовали на 90°, при этом размеры сечения деформированной части изменялись, высота становилась шириной, а ширина — высотой;

4) завершение первого перехода: поковку обжимали по высоте ограничителя без осуществления подачи. После этого перехода получили конечные размеры откованной части поковки;

5) после окончания первого перехода проводили следующие проходы до получения требуемых размеров поковки. При получении поковки необходимых размеров ее вынимали из держателя и выкладывали на асбестовый лист для охлаждения.

Все поковки протягивали на плоских бойках по указанным выше схемам. Величину обжатия ограничивали прокладками. Обжатие осуществляли за два-три удара молота. Каждую поковку получали из одного выноса. Температура окончанияковки всех поковок была в пределах 850 – 950 °С. На всех поковках конец для захвата клещами оставался недеформированным.

С целью испытаний на растяжение из полученных поковок были изготовлены образцы [8]. Для сравнения механических характеристик заготовки и поковки из заготовок также изготовили три образца с такими же размерами, как и образцы из поковок. Испытания на растяжение проводили на разрывной машине EV-40 (Германия). Для построения уравнений регрессии полученные значения механических свойств обрабатывали по методике [9]. Поскольку в данном случае использовали равномерное дублирование опытов, дисперсию оценивания коэффициентов рассчитывали по формуле:

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_y^2}{n \cdot N}, \quad (1)$$

где $S_{b_i}^2$ — дисперсия оценки коэффициентов; n — количество дублей; N — число опытов.

Допустимый интервал коэффициентов регрессии определяли по формуле:

$$\Delta b_i = t_{\alpha; f_1} \cdot S_{b_i}, \quad (2)$$

где $t_{\alpha; f_1}$ — табличная величина критерия Стьюдента при заданных уровнях значимости и степени свободы. Коэффициенты регрессии, абсолютная величина которых больше или равна допустимому интервалу, являются статистически значимыми.

Далее записывали уравнение регрессии с учетом статистической значимости коэффициентов регрессии. В данном случае получились четыре уравнения

регрессии, по которым рассчитывали механические свойства и дисперсию неадекватности $S_{неад}^2$:

$$S_{неад}^2 = n \sum_{u=1}^N (y_{u,расч} - \bar{y}_{u,эксп})^2, \quad (3)$$

где $y_{u,расч}$ и $\bar{y}_{u,эксп}$ — значения отклика в опыте u , соответственно рассчитанные по уравнениям регрессии и определенные экспериментально. Гипотезу об адекватности построенных моделей проверяли по критерию Фишера $F_{f_1, f_2}^{расч}$, его расчетное значение находили по формуле:

$$F_{f_1, f_2}^{расч} = \frac{S_{неад}^2}{S_y^2}. \quad (4)$$

Для каждого опыта рассчитывали дисперсию опытов $S_{y_u}^2$:

$$S_{y_u}^2 = \frac{\sum_{q=1}^{n_u} (y_{uq} - \bar{y}_u)^2}{f_u}, \quad (4, а)$$

где y_{uq} — результат повторения q опыта u ; \bar{y}_u — среднее арифметическое значение всех дублей n_u опыта u ; f_u — число степеней свободы при определении дисперсии опыта u , $f_u = n_u - 1$, где n_u — количество дублей в опыте u . Дисперсия системы находится по формуле

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^N S_{y_u}^2}{N}. \quad (4, б)$$

В результате математической обработки экспериментальных данных получили уравнения регрессии:

$$y_1 = 339 + 32,75x_3 + 26,83x_{12}, \quad (5)$$

$$y_2 = 464,58 + 30,5x_3, \quad (6)$$

$$y_3 = 28,94 + 1,74x_2 - 2,56x_3 + 1,87x_{123}, \quad (7)$$

$$y_4 = 64,75 - 1,04x_2 + 0,91x_{23}. \quad (8)$$

Из формулы (5) видно, что наиболее сильно на предел текучести влияет уков, меньшее влияние оказывает общее действие схемы кантования и относительной подачи. Как видно из уравнения (6), временное сопротивление зависит только от укова и имеет максимальное значение при укове 1,5. Относительное удлинение δ_5 (формула (7)) зависит от нескольких факторов, но наибольшее влияние имеет уков. Причем при его минимальном значении 1,5 относительное удлинение больше, чем при максимальном. Меньшее влияние оказывает совместное действие относительной подачи, схемы кантовки и укова. Относительное сужение ψ (формула (8)) сильно зависит от величины относительной подачи, увеличиваясь при ее уменьшении. Меньшее влияние на ψ оказывает общее действие относительной подачи и укова.

Следовательно, показатели прочности — предел текучести и временное сопротивление — наиболее сильно зависят от укова, показатели пластичности (относительные удлинение и сужение) — от величины относительной подачи и величины укова. Увеличение укова приводит к повышению прочности и уменьшению пластичности. Схема кантовки на механические свойства не имеет прямого влияния. С уве-

личением относительной подачи величина относительного сужения возрастает.

Выводы и рекомендации

В результате работы по выявлению влияния пластической деформации на механические свойства поковок при свободной ковке определены зависимости механических свойств, характеризующие процесс протяжки. Проведено экспериментальное исследование деформации по составленному плану на молоте с массой падающих частей 50 кг и использованием печи электросопротивления с карборундовыми нагревательными элементами.

Полученные поковки испытали на растяжение, по результатам построили диаграммы растяжения, по которым определили численное значение предела текучести, временного сопротивления, относительных удлинения и сужения. Обработка результатов эксперимента позволила составить регрессионные уравнения зависимости показателей пластичности и прочности от укова, относительной подачи и схемы кантовки.

Проведенные исследования являются основой для дальнейшего изучения этого вопроса, полученные лабораторные результаты следует проверить в промышленных условиях при ковке слитков коррозионностойких сталей 03X18H10 и 03X17H12M, поставляемых с контролем механических свойств и работы удара как в продольном, так и в поперечном направлениях к оси поковки. Также целесообразно провести подобный эксперимент на промышленном прессе при ковке слитков инструментальных сталей 4X5MФС, 4X5M3Ф, X12MФ и др. и жаропрочных сплавов, поковки из которых контролируют металлографически исследованиями и механическими испытаниями в различных направлениях к оси профиля.

Библиографический список

1. Соколов Л. Н., Голубятников Н. К., Ефимов В. Н., Шелаев И. П. Теория и технологияковки : учебник для вузов. — Киев : Высшая школа, 1989. — 317 с.
2. Охрименко Я. М. Технология кузнечно-штамповочного производства : учебник для вузов. — М. : Машиностроение, 1966. — 592 с.
3. Шабуров В. Е., Казаринов Б. Н. Влияние условий деформации при протяжке заготовок на пластичность металла // Кузнечно-штамповочное производство. 1975. № 11. С. 10 — 13.
4. Антошенко Ю. М. Оптимизация технологических параметровковки-протяжки // Кузнечно-штамповочное производство. 2000. № 12. С. 11 — 13.
5. Веретеников Э. В. Исследование деформированного состояния заготовок валов при протяжке вырезными бойками // Кузнечно-штамповочное производство. 1979. № 8. С. 5 — 7.
6. Залесский В. И., Корнеев Д. М., Петросян Р. С., Бочаров В. А. Распределение деформаций при протяжке крупных поковок // Кузнечно-штамповочное производство. 1966. № 12. С. 3 — 6.
7. Онищенко А. К., Веретеников Е. В. Исследование термомеханических режимов протяжки и структуры поковок роторов // Кузнечно-штамповочное производство. 1977. № 3. С. 2 — 4.
8. Авдеев Б. А. Техника определения механических свойств материалов : учебник для вузов. — М. : Машиностроение, 1965. — 484 с.
9. Новик Ф. С., Арсов Я. Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов : учебник для вузов. — М. : Машиностроение, 1980. — 304 с.

Модернизация металлографического оборудования ЦЗЛ ПАО “Днепроспецсталь”

А. С. Сальников, А. В. Жайворонок,
Ю. Н. Бортников
ПАО “Днепроспецсталь”
(г. Запорожье, Украина)

Показаны результаты крупномасштабной инвестиционной программы модернизации металлографического оборудования и приобретения программно-аппаратного комплекса (ПАК) с системой обработки изображения “ВидеоТест-Металл” на базе микроскопа “Zeiss Axiovert 200MAT” и электронного растрового микроскопа “SUPRA 40 WDS” высокого разрешения с системой микроанализа Oxford Instruments INCA 350 и датчиками EDX, WDX и EBSD. Новое современное аналитическое оборудование значительно повысило информативность проводимых в ЦЗЛ исследований, направленных на повышение качества выпускаемой металлопродукции.

Ключевые слова: микроскоп, исследования, сталь, качество, анализатор изображения, методики, неметаллические включения, дефекты, свойства, фазы, пробоподготовка.

ПАО “Днепроспецсталь” специализируется на выпуске высококачественной металлопродукции из легированных конструкционных и инструментальных (в том числе подшипниковых и быстрорежущих), коррозионноустойчивых сталей и жаропрочных сплавов. Главную роль предприятие видит в том, чтобы осуществлять выпуск и поставку продукции, которая отвечает требованиям потребителей, гарантирует удовлетворение их запросов. Система менеджмента качества ПАО “Днепроспецсталь” сертифицирована на соответствие требованиям ISO 9001:2008.

Качество выпускаемой продукции для производителя напрямую связано с возможностью точно и быстро определять ее характеристики, выявлять дефекты и причины их возникновения, оперативно корректировать технологию производства. В связи с поставками продукции на зарубежные рынки потребовалось освоить новые стандарты и методики контроля качества металла. Уходит в прошлое визуальная металлография, основанная на субъективной оценке микроструктуры по принятым шкалам. Все большая роль в современной металлографии отводится автоматическим системам обработки изображения при анализе качества металлопродукции. Микроскопы (такие, как МИМ-6, МИМ-7, МИМ-8 и даже “Неофот”), которые были в распоряжении специалистов-исследователей, устарели как морально, так и физически. Срок службы оптики строго ограничен международными стандартами (до 7 лет) и дальнейшее ее использование приводит к искажению изображения и, как следствие, неправильной оценке качества металла. Методическими стандартами предусмотрен контроль качества металлопродукции на высококачественном современном оборудовании.

ПАО “Днепроспецсталь”, являясь крупнейшим экспортером металлопродукции из специальных сталей и сплавов, на протяжении ряда лет последовательно проводит политику технического перевооружения. Наряду с проведением крупномасштабной инвестиционной программы по модернизации основного оборудования производственных цехов ведется переоснащение вспомогательных служб, в том числе и ЦЗЛ завода. В рамках инвестиционных проектов 2006 г. осуществлен проект по модернизации оборудования металлографической и рентгенофизической лабораторий.

Для обеспечения полноценного и объективного контроля качества на современном уровне руковод-

ством завода было принято решение о приобретении нового аналитического оборудования — программно-аппаратного комплекса (ПАК) с системой обработки изображения “ВидеоТест-Металл” на базе микроскопа “Zeiss Axiovert 200MAT”, оборудованного автоматизированным предметным столиком. Возможности ПАК соответствуют современному научно-техническому уровню, международным стандартам и позволяют осуществлять контроль без участия оператора, т. е. исключить субъективный фактор. Важнейшим отличием компьютерной идентификации и оценки неметаллических включений от визуальных оценок является возможность более тонкой и точной дифференциации за счет количественной характеристики как геометрических, так и оптических параметров.

Состав и свойства комплекса определяются теми задачами, которые он призван решать. При этом его свойства не являются простой совокупностью свойств отдельных комплекующих, подобранных в соответствии с конкретной задачей. Соединение в единую систему отдельных приборов позволяет получить новые возможности, которыми не обладает ни одна из составляющих сама по себе. Например, ни микроскоп, ни камера, ни компьютер в отдельности не могут измерять оптические параметры объекта, а анализатор, собранный на их основе, обладает свойством проведения фотометрических измерений.

Анализатор изображений для световой микроскопии, как правило, имеет модульное строение и состоит из системы ввода изображений (микроскоп, камера), компьютера (ПК) и принтера для документирования на бумажном носителе полученных результатов. Проводя аналогии с органами человека, можно сказать, что камера — это “глаза”, фиксирующие световые волны, поступающие от объекта. Компьютер в этом комплексе является “мозгом”, он обеспечивает управление и контроль вводом и выводом информации, производит измерения и анализ накопленных результатов обработки изображений. Именно в ПК сигнал от камеры преобразуется в изображение, которое визуализируется на экране монитора.

Модульность строения обеспечивает гибкость системы анализа изображений, которая с легкостью может быть адаптирована к потребностям пользователя в зависимости от задачи, которую он собирается решать с помощью анализатора. Адаптация может проводиться



ЦЗЛ — 75 лет!

Специалисты Центральной заводской лаборатории, имея в своём распоряжении современные исследовательские приборы, готовы решать практически любые задачи, которые ставят потребители металла

не только модернизацией или заменой модуля, но также и установкой специализированного программного обеспечения по обработке изображений [1].

Программно-аппаратный комплекс в ЦЗЛ ПАО “Днепроспецсталь” состоит из современного светового инвертированного микроскопа “Axiovert 200MAT” производства известной компании “Karl Zeiss”. Конструкция нового микроскопа очень удобна для работы исследователя. Проработав много лет на микроскопе предыдущего поколения этой фирмы “Неофот-21”, металловеды реально ощутили, насколько далеко вперед шагнула техника. Оборудование является идеальным для любого метода наблюдения (светлое, темное поле, поляризованный свет и дифференциально-интерференционный контраст с дополнительными модулями DIC). За счет превосходной оптики наблюдаемое в микроскопе изображение четкое, объемное, рельефное и настолько детальное, особенно при использовании метода DIC, что значительно облегчает классификацию дефектов, структурных составляющих и в особенности неметаллических включений. Кроме этого, предоставлена возможность производить исследования в промежуточных увеличениях, которые удается получить, используя трехпозиционную кодированную систему Ortopag с коэффициентами 1х; 1,25х; 1,6х.

В состав программно-аппаратного комплекса входит компьютер, на который установлено специализированное программное обеспечение “ВидеоТест-Металл”. Его назначение — автоматизация и ускорение процессов металлографического контроля качества металлопродукции наряду с повышением точности и достоверности результатов контроля.

Программное обеспечение позволяет проводить оценку загрязненности неметаллическими включениями, зернистости, основных элементов структуры и определять толщину слоя металлов и сплавов в соответствии с отечественными и зарубежными стандартами металлографического контроля (ГОСТ, ASTM, ISO, DIN). При выполнении анализа по любому из стандартов, одновременно выполняются измерения (расчеты) и по другим, методически близким стандартам, предоставляя возможность просмотра и вывода на печать отчета с результатами испытаний по каждому из стандартов.

Анализ всех методик показал, что абсолютное большинство (90 %) действующих стандартов регламентирует ручные (визуальные) металлографические методы. На автоматические методы металлографического контроля в мире разработаны и действуют только три стандарта ASTM E 1122, E 1245, а теперь и E 45 (оценка неметаллических включений) и ASTM E 1382 (определение средней величины зерна). Существует также стандарт на методику приготовления образцов для автоматического контроля неметаллических включений в стали — ASTM E 768. С целью обеспечения единства измерений изученные методы подразделяются на два вида металлографического контроля: автоматический и автоматизированный. Принципиальные различия заключаются в том, что автоматизированные методы — это компьютеризованные ручные (визуаль-



Рис. 1. Растровый электронный микроскоп SUPRA 40 WDS

ные) методики, автоматизация которых только значительно сокращает трудозатраты и время контроля, но не меняет достоверность, точность и воспроизводимость результатов по сравнению с ручной (визуальной) оценкой. В то же время автоматические методы базируются на законах геометрической вероятности, количественной и стереометрической металлографии, математической статистики.

Программно-аппаратный комплекс ориентирован на автоматический анализ изображений металлографических шлифов, поэтому для него используют образцы, изготовленные с высоким качеством на плоскополировальных станках, т. е. на современных линиях пробоподготовки. На шлифах не должно быть “завалов”, широких и глубоких царапин, границы зерен должны быть хорошо видны. В этом случае анализ проводится автоматически без вмешательства пользователя. В случае необходимости проведения анализа на некачественном образце программа дает возможность пользователю вручную править контуры выделенных объектов, однако это увеличивает время проведения анализа.

Освоенный и внедренный автоматический контроль загрязненности неметаллическими включениями с помощью ПАК “ВидеоТест-Металл” позволил предприятию выполнить ответственный заказ на поставку металлопродукции диам. 120 мм из коррозионностойкой нержавеющей стали 08Х18Н10Т-Ш. По требованию потребителя загрязненность неметаллическими включениями при оценке по стандарту ASTM E45-05 (метод D) не должна превышать по максимальному баллу тонкие серии — балл 1,5 и толстые серии — балл 1,0 для всех видов включений (А, В, С, D). Полный количественный анализ всех включений, обнаруженных при непрерывном сканировании, позволил получить количественные данные, усредненные по всем включениям на стандартной площади шлифа, равной 160 мм² (320 полей зрения на каждом образце), которые объективно констатируют фактические различия между типами включений как по геометрическим параметрам, так и по характеристикам формы и отражательной способности. При визуальной (ручной) оценке такая точность дифференциации неметаллических включений недостижима.

Автоматизация позволила значительно сократить время и трудоемкость контроля, повысить объективность, достоверность и воспроизводимость результатов. Правильность компьютерной идентификации всех исследованных неметаллических включений, осуществленной в автоматическом режиме, проверяли

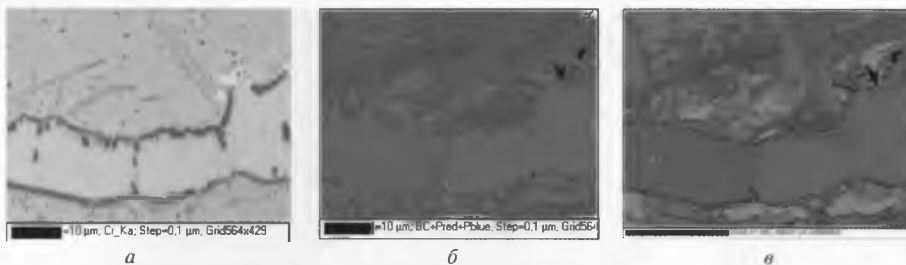


Рис. 2. Изображение участка поверхности стали, полученное методом картирования детектором: *а* — EDS в излучении Cr (K α); *б* — EBSD, индексация фаз (красный цвет — 92 % феррита, синий — 4 % карбида хрома Cr₂₃C₆, зеленый — 0,6 % карбида ниобия Nb₆C₅; *в* — EBSD (карты ориентации зерен)

путем исследования на растровом электронном микроскопе их спектров, из которых следует, что основой большинства крупных розовато-желтых частиц правильной геометрической формы является нитрид титана или оксинитрид титана, полные сведения о которых приведены в работе [2, с. 255 – 357]. Нетрадиционные и экстремальные включения распознаются в автоматическом режиме и разделяются по разным типам А, В, С, D, “Ds Oversized” и “Dos Oversized” в соответствии с уровнем яркости и процентом площади, занимаемой каждой составляющей. Методикой стандарта ASTM E 45 предусмотрена оценка таких включений только в том случае, если потребитель дополнительно оговорил их оценку.

Кроме этого, в рамках того же инвестиционного проекта был приобретен электронный растровый микроскоп “SUPRA 40 WDS” высокого разрешения с системой микроанализа Oxford Instruments INCA 350 (рис. 1). Микроскоп оснащен датчиками EDX, WDX и EBSD. Это значительно повысило информативность проводимых в ЦЗЛ исследований, направленных на повышение качества выпускаемой металлопродукции. Примером эффективности таких исследований могут служить изменения в технологии производства подшипниковых сталей, особенно ШХ15СГ, которые привели к тому, что количество образцов с недопустимыми неметаллическими включениями снижено в 10 раз.

Постоянное повышение требований к качеству выпускаемой металлопродукции по механическим, прочностным свойствам, по уровню загрязненности стали неметаллическими включениями не позволяет останавливаться на достигнутом и приводит к необходимости систематического обновления исследовательского оборудования. С помощью оборудования,

которое в настоящее время имеет ЦЗЛ, проводится количественная оценка структурных составляющих сталей и во взаимосвязи, например, с прочностными свойствами. Построение карты фаз при проведении микрорентгеноспектрального анализа отдельных участков поверхности излома стали 08X18H10T позволяет количественно оценить их “загрязненность” различными видами неметаллических включений и увязать данный параметр с величиной работы удара.

Еще более весомый вклад в проводимые исследования дает такой современный метод исследования в растровой электронной микроскопии, как дифракция отраженных электронов (EBSD). С его помощью можно исследовать различные кристаллические материалы для измерения микроструктур и микротекстур, ориентации кристаллитов, свойств границ зерен. В комбинации с анализом химического состава этот метод можно использовать для идентификации неизвестных фаз. Таким образом, дифракция отраженных электронов дает полный обзор физических свойств материалов на уровне микроструктуры (рис. 2).

Намечаемое ПАО “Днепроспецсталь” внедрение нового инвестиционного проекта и приобретение приборов пробоподготовки для ЦЗЛ позволят существенно повысить качество исследуемых шлифов, что крайне важно для повышения точности получаемых результатов.

Библиографический список

1. Пантелеев В. Г., Егорова О. В., Клыкова Е. И. Компьютерная микроскопия. — М.: Техносфера, 2005. — 304 с.
2. Лунев В. Г., Пирожкова В. П., Грищенко С. Г. Неметаллические включения в сталях, чугунах и ферросплавах. — Запорожье: Днепропетровский металлург, 2006. — 384 с.

УДК 658.562.64

СМК ПАО “Днепроспецсталь” — фактор усиления позиций на рынке спецсталей

И. А. Алферов, А. С. Учайев
ПАО “Днепроспецсталь”
(г. Запорожье, Украина)

Дана оценка состояния системы менеджмента качества на предприятии, влияния СМК на позиции ПАО “Днепроспецсталь” на рынке специальных сталей. Обозначены решаемые ею задачи, определены ближайшие перспективы развития СМК, приведены конкретные достижения.

Ключевые слова: система менеджмента качества, состояние, задачи, улучшение, сеть процессов, потери, сертификаты.

В современных рыночных условиях ориентация на потребителя, на удовлетворенность его качеством приобретенной продукции является необходимым условием существования любого производителя. В

значительной степени это касается и ПАО “Днепроспецсталь” — предприятия, производящего специальные стали и сплавы, используемые в авто- и судостроении, железнодорожном транспорте, химическом ма-

шиностроении, атомной энергетике и авиастроении. В перечисленных отраслях промышленности требования к качеству металлопродукции всегда были и остаются повышенными.

Обеспечение этих требований путем предупреждения отклонений или снижения риска их появления в процессах планирования, изготовления и выпуска продукции — основная цель системы менеджмента качества ПАО «Днепроспецсталь», сертифицированной на соответствие ISO 9001:2008.

Начиная с КС У КП советского периода система качества предприятия постоянно адаптировалась к изменяющимся внешним условиям, будь то версии стандартов ISO 9000 или ужесточение требований потребителей на рынке спецсталей. И в настоящее время система менеджмента качества предприятия остается одной из систем управления, органично встроенных в общую систему бизнес-процессов. При этом SMK — единственная стандартизованная система управления, ориентированная на удовлетворение запросов потребителей и получение требуемого качества продукции, которое, как известно, обеспечивается качеством процессов. Поэтому перед SMK поставлены две задачи: внутренняя задача — обеспечить качество процессов; внешняя задача — обеспечить условия для сертификации металлопродукции разных видов независимыми сертифицирующими органами и получение сертификатов, подтверждающих факт того, что металлопродукция специфического назначения обладает качеством, необходимым на рынке спецсталей.

Сегодня SMK ПАО «Днепроспецсталь» — структурированная, взаимосвязанная и эффективная сеть процессов: управления и развития, добавляющих ценность и обеспечивающих. Все они задокументированы в виде стандартов предприятия. В каждом процессе установлена цель, определены оптимальный алгоритм достижения цели и оценка степени ее выполнения, а также ответственность и полномочия владельца и участников процесса. Стандарты предприятия размещены в виде электронных документов в базе данных предприятия. Внедрение IT-технологий в SMK позволило сократить длительность поиска и упростить использование необходимого пакета документов.

Основная работа по совершенствованию процессов производства направлена на сокращение потерь, связанных с обеспечением качества продукции. Эту работу возглавляют специалисты управления качеством совместно со службой персонала. Ими разработаны и введены в действие положения по сталеплавному и передельному производствам, позволяющие предотвратить появление не соответствующей нормативам продукции путем фиксации нарушений технологических процессов и выполнить действия корректирующего характера. По результатам работы в I квартале 2012 г. по сравнению с IV кварталом

2011 г., когда начали действовать указанные положения, потери от брака в сталеплавильном производстве сократились на 10,4 %, в передельном производстве — на 20 %. За тот же период на 20 % уменьшилось количество претензий потребителей. Эта работа продолжается и совершенствуется, в том числе с учетом предложений специалистов цехов.

В настоящее время наиболее рентабельные и выгодные для нас виды легированной металлопродукции используются, как было указано выше, в специальных условиях: в устройствах, работающих под давлением, в судостроении, железнодорожном транспорте, атомной энергетике и авиастроении. В указанных отраслях может использоваться только продукция, прошедшая сертификацию или приемку независимыми организациями. При этом обязательным условием для проведения приемки или сертификации является наличие сертифицированной системы качества. Эффективные процессы и зрелое в целом состояние SMK способствуют созданию условий для сертификации и приемки металлопродукции различного вида и подтверждения ее качества сертификатами независимых сертифицирующих органов. Особенно отчетливо это проявляется при сертификации производства авиационных сталей и сплавов и черновых железнодорожных осей. Сертифицированная и соответствующая требованиям ISO 9001:2008 система качества сыграла существенную роль при получении решения о применении, выданного Росэнергоатомом на продукцию ПАО «Днепроспецсталь», используемую при производстве оборудования и трубопроводов для российских АЭС.

В ПАО «Днепроспецсталь» в настоящее время, кроме сертификата на Систему менеджмента качества, выданного обществом TÜV Thuringen, имеются следующие сертификаты: сертификаты «Lloyd Register» и «Germanischer Lloyd», подтверждающие соответствие требований этих обществ к качеству горячекатаных и кованных прутков, в том числе трубных заготовок, используемых в судостроении; сертификат Авиационного регистра МАК на производство сталей и сплавов авиационного назначения; сертификаты Регистра сертификации на ФЖТ России на производство черновых локомотивных и вагонных осей; сертификаты TÜV Rheinland на продукцию, соответствующую Европейской директиве 97/23 ЕС и своду немецких правил AD 2000 Merkblatt W0 для сосудов под давлением; сертификат DET Norske Veritas на продукцию для судостроения и свидетельство признания изготовителя, выданное Российским морским регистром на продукцию для судостроения.

Таким образом, эффективная система менеджмента качества и перечисленные выше сертификаты различных независимых обществ позволяют ПАО «Днепроспецсталь» уверенно удерживать позиции на рынке специальных сталей и сплавов.

"Днепроспецсталь": стратегия — энергоэффективность

Выполнен анализ мероприятий по обеспечению надежности и эффективности энергооборудования за последние годы.

Ключевые слова: энергобезопасность, энергоэффективность, локальные системы, оборотные циклы, электрические режимы.

Электрометаллургический завод "Днепроспецсталь" — современное энергоемкое предприятие, в составе которого функционируют технологические и энергетические установки, образующие в совокупности производственный комплекс. Для обеспечения надежной и экономичной работы как отдельных агрегатов, так и предприятия в целом учитываются реальные (вплоть до часовых) графики и режимы работы всех генерирующих и потребляющих установок в любой период времени. От построения схемы электроснабжения, теплоэнергетической системы потребления энергоресурсов зависят объемы и эффективность их использования на заводе и размеры потерь, а также потребность предприятия во внешних энергоресурсах, капиталовложениях, нагрузка на окружающую среду и др.

Программа по развитию энергетики завода "Днепроспецсталь" рассчитана до 2020 г. и включает три направления: 1) энергобезопасность; 2) повышение надежности электроснабжения; 3) сокращение доли затрат энергетики в себестоимости выпускаемой продукции, повышение энергоэффективности.

За последние годы успешно решен ряд проблем, что позволило стабилизировать снабжение предприятия всеми видами энергоносителей, резко сократить аварийность, существенно снизить финансовые затраты. Только за 2011 г. за счет внедрения энегосберегающих технологий затраты на электроэнергию в себестоимости продукции снижены на 3 млн грн.

Большинство мероприятий разрабатываются специалистами завода в тесном сотрудничестве с научно-исследовательскими организациями (Институт электродинамики Национальной академии наук Украины, Институт газа НАН Украины, Запорожская государственная инженерная академия, Запорожский национальный технический университет, Днепрпетровский политехнический институт, Московский энергетический институт, НИИМ "Преобразователь", Всероссийский электротехнический институт, УкрГипропром, ГП "Гипропром", Энергосервисная компания "УкрЭско").

Прошедшие несколько лет для "Днепроспецстали" можно считать в определенном смысле переломными, причем работа велась на фоне постоянно меняющихся правил взаимоотношений потребителей с поставщиками энергоносителей: вышло около 1,5 тыс. документов, регламентирующих эти взаимоотношения. Проведен комплекс мероприятий по снижению непроизводительных расходов сжатого воздуха, что позволило остановить четыре компрессора на ТКС. Были налажены прочные взаимовыгодные связи с НИИ и Запорожским заводом "Преобразователь", которые являются лидерами в разработке и изготовлении современного энегосберегающего оборудования. Один из таких преобразователей установлен для обеспечения плавного пуска и остановки уникального синхронного высоковольтного двигателя 10500 кВ · А на заготовочной клети стана 1050. Его установка

стоимостью около полумиллиона гривен окупилась всего за 8 мес., модернизирована схема управления слитковоза того же стана.

Завод "Днепроспецсталь" стал первопроходцем внедрения лучистого обогрева в Юго-Восточном регионе Украины, что позволяет экономить до 2 млн грн в год.

Смонтированы и введены в эксплуатацию редуцирующие устройства на вводах пара. Созданная смешанная схема теплоснабжения далее развивается путем внедрения локальных электрических миникотельных, размещаемых вблизи отдаленных и тупиковых подразделений-потребителей, исключая тем самым потери тепла в трубопроводах.

Для повышения надежности подачи электроэнергии проведена полная реконструкция сетей электроснабжения завода и системы обеспечения участка готовой продукции ЗАПОРОЖЬЕ ЛЕВОЕ с вводом в эксплуатацию подстанции "Складская". Построены и подключены два независимых ввода природного газа непосредственно к сетям ПАО "Запорожгаз" протяженностью 1500 м.

ПАО "Днепроспецсталь" одним из первых на площадке Запорожья провело работы по переводу завода с коммерческого на дифференцированный учет электроэнергии. Затраты на приобретение и монтаж оборудования, отладку работы системы составили 700 тыс. грн и окупились в течение 1 мес. Общий экономический эффект от использования электроэнергии в часы льготной оплаты с 2001 г. составил 39947 тыс. грн.

Одновременно с этим проводится оптимизация работы действующих агрегатов. Завершены разработка и внедрение автоматической системы управления электрическими режимами дуговых печей СПЦ-2 и систем лимитирования подачи электроэнергии к дуговым сталеплавильным печам СПЦ-2 и -3, а также системы мониторинга теплового баланса печей СПЦ-2. Внедрены тиристорные преобразователи на насосных агрегатах оборотного цикла газоочисток СПЦ-2 и -3. В результате этих мероприятий удалось снизить расход электроэнергии более чем на 10 %.

Проведена работа по переходу на сервисное обслуживание ряда сетей и агрегатов:

1. Электроремонтный цех выполняет ремонты трансформаторов на подстанциях (работы по первому классу напряжения).

2. ТТЛ цеха КИПиА совместно с организацией ЗМС 93 проводит эколого-теплотехнические испытания газоиспользующих агрегатов.

3. Энергосиловой цех совместно с организацией МНУ-34 занимается сервисным обслуживанием установок доочистки питьевой воды и оборотных систем технического водоснабжения.

Проводятся работы по развитию внутривзаводской системы учета энергоносителей с внедрением учета управления магистральным тепло- и газоснабжением.

Суммарный экономический эффект проведенного комплекса мероприятий только за 2011 г. составил 11 млн грн.