

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ НАУЧНОЙ И ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

ВНЕПЕЧНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ НА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ЗАВОДАХ

А.В. Протасов, вед. спец. АО АХК «ВНИИМЕТМ», канд. техн. наук,
avprotasov@yandex.ru

Рецензент: И.В. Чуманов, д-р техн. наук, проф., ФГАОУ ВО «Южно-Уральский
государственный университет», chumanoviv@susu.ru

Металлургическое производство в литейных цехах машиностроительных заводов характеризуется рядом специфических особенностей, обусловленных широким разнообразием выпускаемой продукции, жесткими требованиями к качеству производимого металла, особенно — ответственного назначения. Соответственно, литейное производство машиностроительных заводов оснащается наиболее совершенным технологическим оборудованием разнообразных видов с широкими технологическими возможностями. Не случайно именно на машиностроительных предприятиях были впервые применены основные виды агрегатов внепечной обработки. Поэтому история и современное состояние внепечной обработки металла на машиностроительных заводах нуждается в подробном изучении.

Также следует отметить, что литейное производство не в полной мере использует доступные широкие технологические возможности современных методов. Некоторые из них рассмотрены в статье.

Ключевые слова: металлургическое производство, литейное производство машиностроительных заводов, внепечная обработка металла, циркуляционные вакууматоры, крупнотоннажные слитки.

SECONDARY METALLURGY AT MACHINE-BUILDING PLANTS

A.V. Protasov, Leading Specialist, JSC AHC «VNIIMETMASH», Doctor of Engineering,
avprotasov@yandex.ru

Metallurgical production in machine-building foundries is characterized by a number of specific features, due to a wide variety of products, particularly stringent requirements for the quality of the metal produced, as a rule, for a responsible purpose. Accordingly, the foundry of machine-building plants is equipped with the most advanced technological equipment of various types with wide technological capabilities. It is no coincidence that it was at machine-building enterprises that the main types of secondary processing units were first used. Therefore, the history and current state of secondary metal processing at machine-building plants needs to be studied in detail.

It should be noted that the foundry does not take full advantage of the available wide technological possibilities. Some of that is discussed in that articles.

Keywords: metallurgical production, foundry production of machine-building plants, out-of-furnace metal processing, circulating vacuum degassers, large-tonnage ingots.

Металлургическое производство машиностроительных заводов основано на разливке стали в изложницы. Мировой объем стали, разливаемой в слитки, составляет примерно 60–80 млн т/г. (8–9% от общего объема сталеплавильного производства). Марочный и гео-

метрический сортамент характеризуется значительным разнообразием. В слитки разливают кипящие стали, некоторые легированные стали, а также особо сложные высоколегированные стали, предназначенные для производства крупных поковок ответственного назначения массой до 600 т, применяемые в тяжелом, энергетическом и транспортном машиностроении. Наблюдается тенденция увеличения массы отливаемых слитков.

Вместе с тем, наряду с этим развивается массовый выпуск относительно небольших слитков для эксклюзивной продукции широкого ассортимента, удовлетворяющих самым жестким требованиям к качеству и эксплуатационным свойствам.

Доля металлов и сплавов, выплавляемых в литейных цехах машиностроительных заводов, составляет весьма незначительную часть от общего объема производства. Так, например, в соответствии с концепцией развития литейного производства до 2020 г. и в перспективе до 2030, разработанной Минпромторгом РФ, производство отливок из черных и цветных сплавов в России к 2020 г. должно было составить 5,2 млн т (однако помешал экономический кризис, вызванный мировой пандемией). Основными потребителями продукции литейного производства являются предприятия горнодобывающего и железнодорожного машиностроения, автомобильная, оборонная промышленности, авиационное и космическое машиностроение, электротехническая промышленность [1].

Несмотря на относительно небольшие объемы производства, ввиду ответственного назначения и сложного марочного состава выпускаемой металлопродукции, для решения актуальных технологических задач именно в машиностроении широко применяются самые современные технологии и оборудование, необходимые для получения высококачественной металлопродукции ответственного назначения. Не случайно именно на машиностроительных предприятиях впервые были применены отечественные вакууматоры струйного типа (Уралмаш), а также установлены первые отечественные опытно-промышленные циркуляционные вакууматоры (завод Большевик, Ленинград), а также закуплены первые импортные агрегаты: циркуляционный вакууматор для обработки плавок массой 120 т конструкции Стандарт Мессо на Краматорском заводе литья и поковок (в настоящее время Энергомашспецсталь), а также комбинированный двухстендовый агрегат конструкции АСЕА на Ижорском машиностроительном заводе (ОМЗ-Ижора).

В СССР процессом отливки крупных слитков в вакууме начали заниматься в 1955 году, а в конце 1956 года на Уралмаше внедрена установка для отливки слитков массой от 30 до 120 т [2], представляющая собой металлическую камеру цилиндрической формы, накрываемую герметичной крышкой, в которой имеется отверстие, перекрываемое листом из алюминия или тонкой жести. На крышку устанавливают промежуточный ковш массой 18 т со сталевыпускным отверстием, располагаемым соосно с отверстием в крышке, в вакуум-камере размещают изложницу и создают вакуум.

В сталеплавильных цехах машиностроительных заводов внепечная обработка применяется при получении отливок и поковок из высококачественной стали для судостроения, машиностроения и т.д. Отличительными особенностями данного производства являются разнообразие и сложный состав обрабатываемых сталей, повышенные требования к качеству, широкие пределы колебаний массы получаемых слитков. При этом оборудование для внепечной обработки стали должно характеризоваться универсальностью и гибкостью, широкими технологическими возможностями, а технология — высокой эффективностью и комплексным характером.

На Краматорском заводе «Энергомашспецсталь» был установлен циркуляционный вакууматор, предназначенный для обработки конструкционных и легированных сталей с целью получения из них высококачественных слитков массой до 100 т.

Процесс вакуумирования продолжается 15–30 мин. и контролируется по количеству отходящих газов, остаточному давлению в вакуум-камере, расходу аргона, а также с помощью видеокамеры. Температура металла вовремя контролируется с помощью термопар погружения [3].

В сталеплавильном цехе завода Шкода (г. Пльзень, Чехия) установлен двухстендовый агрегат внепечной обработки АСЕА с двумя типоразмерами ковшей вместимостью 60 и 120 т, а также вакуумный кессон для отливки слитков из высококачественной стали. Индукционный перемешиватель, установленный на тележке, разделен на три подвижные секции, что позволяет применять его для малого и большого ковша. Стенд нагрева оснащен крышкой с электродами Ш400 мм и трансформатором мощностью 12,5 МВА. Для откачки газов используют вакуумный насос производительностью 400 тыс. м³/ч.

В состав агрегата входят бункеры для ферросплавов и шлакообразующих, размещенные под бункерами подвижные весы, с помощью которых по команде с пульта управления осуществляется подача порций материалов в приемную воронку ленточного транспортера и далее в ковш. Кроме того, агрегат оснащен фурмой для вдувания порошков в металл и кислородной фурмой для окислительного вакуумирования коррозионностойкой стали.

Печной шлак удаляется путем перелива стали из обычного сталеразливочного ковша в тигель-ковш агрегата АСЕА, после чего на поверхности металла наводят синтетический. Плавки массой 60 т обрабатывают шлаком, содержащим 60 % СаО, 22 % Al₂O₃, 10 % MgO и 8 % SiO₂. При этом содержание серы в стали уменьшается с 0,027 до 0,008–0,009 %. Концентрация серы менее 0,005 % достигается введением порошковой проволоки.

Агрегат аналогичного типа эксплуатируется в ПО «Ижорский завод», где в ковшах вместимостью до 150 т при перемешивании металла электромагнитным полем осуществляют нагрев, доводку химического состава, вакуумирование стали и удаление серы наведенными восстановительными шлаками. В процессе обработки применяют перемешивание ванны аргоном. В процессе вакуумирования нераскисленного металла концентрация азота в стали снижается на 16–49 %, водорода на 27–58 %. Дегазацию металла, содержащего водород в количестве 4–5 см³/100 г, до уровня 2–1 необходимо проводить в течение 22 и 48 мин. соответственно.

В сталеплавильном цехе фирмы Creusot-Loire (Франция) были установлены два агрегата внепечной обработки типа VAD-Vacuum Arc Degassing для обработки плавок массой 100 т. Цех оснащен тремя дуговыми печами, из них две садкой по 100 т и одна – 60 т. В состав выпускаемой цехом продукции входят слитки массой 3–30 т, предназначенные для дальнейшей прокатки на лист, слитки 40–90 т, отливки массой до 300 т.

Наведенный основной шлак обеспечивает степень десульфурации более 80 % (иногда до 95 %). Регулярно достигается содержание серы 0,001 %. Обработка металла длится 45–90 мин. и состоит из трех этапов: нагрев и гомогенизация состава при разряжении 80 кПа; регулирование химического состава с отбором проб и вводом ферросплавов через шлюзовое устройство; дегазация при остаточном давлении 133,3 Па.

При производстве поковок массой более 100 т металл выплавляют в одной печи в две плавки. Первая плавка остается в тигель-ковше до выпуска второй плавки. Затем при обработке второй плавки первая отстаивается в ковше, не входящем в состав агрегата. Падение температуры составляет около 40 °С.

Ведущим предприятием Чехии с развитой внепечной обработкой является концерн Витковице, в сталеплавильном цехе № 2 которого впервые были применены струйное вакуумирование при литье слитков, порционное вакуумирование, окислительное вакуумирование коррозионностойких сталей, обработка стали путем вдувания порошкообразных реагентов. Несмотря на трудности, связанные со значительными тепловыми потерями, обусловленными малой массой обрабатываемых плавок (50 т) и транспортированием ковшей, тщательное соблюдение производственных инструкций позволило добиться значительных результатов. В цехе обрабатывается более 360 различных сортов стали от обычной углеродистой до высоколегированной коррозионностойкой в слитках массой 0,56–135 т. Особенно высокие требования к качеству продукции предъявляются к стали для коленчатых валов судовых двигателей, котлов, роторов, турбин, химических и ядерных реакторов. Набор оборудования

для внепечной обработки жидкой стали позволяет применять различные варианты комплексной технологии получения слитков из высококачественной стали, многие из которых разработаны на комбинате, например процесс «Дулавит» — дуплекс-процесс с двукратным вакуумированием и последующей разливкой в вакуум-камере, которая не только предотвращает насыщение стали газами при разливке, но и обеспечивает более глубокую дегазацию, эта схема была опробована на среднеуглеродистой стали для производства коленчатых валов и применяется для получения всех крупногабаритных поковок из сложных марок стали. Содержание водорода при вакуумировании снижается на 48 %, а при вакуумной разливке еще приблизительно на 15 %. Эти результаты получены при отборе проб из головной части слитка, а в нижней части содержание водорода еще меньше, так как степень удаления водорода зависит от высоты падения капель металла. Порционное вакуумирование, также как и на других сталелитейных заводах, постепенно было вытеснено ковшевыми вакууматорами, а при обработке плавок массой свыше 100 т, как показывает опыт Краматорского завода литья и поковок (позднее Энергомашспецсталь), с успехом может быть применено циркуляционное вакуумирование.

Наряду с глубокой дегазацией металла при отливке высококачественных слитков из сложных марок стали важную роль играет достижение минимальных содержаний серы, а также соблюдение оптимального температурного режима разливки. С целью эффективного содержания серы в сталеплавильных цехах металлургических и машиностроительных заводов с успехом применяется широкий спектр технологических операций: обработка стали синтетическим шлаком, вдувание газопорошковой смеси, обработка подачей порошковой проволоки в сочетании с интенсивным перемешиванием ванны.

Проведение дегазации, легирования и десульфурации металла сопровождается значительными тепловыми потерями, поэтому для подачи металла на разливку с требуемой температурой в узком допускаемом интервале и во избежание необходимости перегрева металла в сталеплавильном агрегате в комплекс современного оборудования для внепечной обработки и рядовых и сложных марок стали как правило входит стенд химического или чаще электрического нагрева. Известны два основных варианта комплексной внепечной обработки стали: с вакуумной дегазацией и нагревом, осуществляемыми на отдельных стендах, и термовакуумной дегазацией расплава на одном комбинированном стенде.

Первый вариант, впервые разработанный шведской компанией ASEA, обладающий широким набором технологических возможностей, нашел применение на многих машиностроительных заводах. В современной вторичной металлургии также широко применяются двухстендовые комплексы, состоящие из двух агрегатов: ковшевого вакууматора и агрегата ковш-печь, снабженного устройством электродугового нагрева металла. Ковшевой вакууматор VD (vacuum degassing) предназначен для глубокой дегазации металла и может быть оснащен кислородной фурмой для проведения окислительного вакуумирования особо низкоуглеродистых и нержавеющих сталей [процесс VOD (Vacuum oxygen decarbonization) или VD-OB (vacuum degassing-oxygen blowing)]. Данные технологические процессы, включающие операции окислительного вакуумирования, могут быть реализованы как на стендах, входящих в состав комплексного агрегата вакуумирования и нагрева, так и на отдельных самостоятельных агрегатах.

Широкое распространение получили агрегаты ковш-печь различных исполнений. В частности, на заводе ОЗММ с успехом применен агрегат ковш-печь отечественной конструкции, отличающийся размещением трех электродов на общей траверсе.

Комбинированный вариант термовакуумной дегазации VAD (vacuum arc degassing), в течение длительного времени широко применявшийся на зарубежных заводах, постепенно уступил место двухстендовым агрегатам (некоторые зарубежные фирмы используют также термин VHD (vacuum-heat degassing) — вакуумно-термическая дегазация). По мнению специалистов концерна Витковице, осуществление различных операций на одном

стенде является менее рациональным, так как существенно усложняет оборудование и затрудняет организацию работ, в особенности при литье крупных слитков из нескольких плавок. Одним из основных достоинств агрегата VAD отмечается именно возможность отливки крупных слитков из нескольких плавок; например, на заводе River Don компании British Steel Corp. (Великобритания) при использовании электродуговой печи емкостью 100 т и агрегата VAD получают 250-тонные слитки. Достоинство процесса – отсутствие перемещения ковша или сводов при переходе операций от нагрева к дегазации или обратно, а также уменьшение габаритов и металлоемкости оборудования. Недостатки данного процесса – сложность оборудования, а также относительно невысокая производительность, что затрудняет его вписывание в процесс получения стали с серийной непрерывной разливкой.

Разработка технологии вакуумно-дуговой дегазации была начата фирмой A. Fink & Sons (США) в 1964 г. Большая часть агрегатов VAD сооружена на заводах разных стран мира в 1970–1990 гг. Благодаря производственной гибкости они могут удовлетворить все требования, связанные с достижением высокой производительности и положительным эффектом обработки жидкой стали. В настоящее время восемь агрегатов термовакуумной дегазации все еще находятся в эксплуатации в разных странах. Основной причиной снижения интереса к данному процессу явилось совершенствование конструкции конкурирующих агрегатов (печь-ковш, ковшовый вакууматор) и оптимизация технологии их использования. Однако австрийская компания Inteco Special Melting Technologies провела исследования с целью совершенствования данного процесса и повышения кокурентоспособности оборудования. Конструктивные усовершенствования повышают кокурентоспособность агрегатов VAD и превращают их в полезную и своевременную альтернативу агрегатам ковш-печь и оборудованию для вакуумной дегазации [4].

Технологию VAD можно использовать при различной последовательности технологических операций, выбор которых определяется поставленными металлургическими задачами и конкретными исходными условиями. Процесс VAD позволяет повысить качество металла при обработке плавок массой от 15 до 200 т. Нагрев, дегазация, обработка шлаком и регулирование содержания основных элементов производятся непрерывно в условиях вакуума. Герметизированные установки для обработки стали в сочетании с откачным оборудованием исключают выделение вредных веществ в окружающую среду.

По сравнению с другими процессами вторичной металлургии важнейшими преимуществами процесса электродугового нагрева под вакуумом являются следующие:

- более низкая температура выпуска плавки и, следовательно, более длительный срок службы огнеупорной футеровки, как в печи, так и в сталеразливочном ковше;
- возможность введения большего количества легирующих элементов под вакуумом;
- сокращение времени от выпуска до выпуска плавок, повышение производительности цеха и сокращение расходов по переделу.

Обработка стали под вакуумом может продолжаться столько времени, сколько необходимо для достижения максимального эффекта. Это позволяет сталеплавильщикам выдерживать ковш в позиции обработки при возникновении проблем на МНЛЗ.

Жидкую сталь разливают в стандартный ковш с высотой свободного борта 500–800 мм. Цеховым мостовым краном ковш переносится в вакуумную камеру, имеющую крышку, поддерживаемую тремя гидравлическими цилиндрами на подъемной раме. В центре крышки установлены три регулируемых электрода.

Вакуум в камере создается многоступенчатым паровыхнаторным насосом (в качестве альтернативы можно применять механический вакуумный насос). Во время обработки плавки через днище ковша подается инертный газ, обеспечивающий циркуляцию расплава. По достижении требуемого вакуума электроды устанавливаются в нужном положении над ванной, и электрическая цепь замыкается. Графитовые электроды установлены в герметичных теле-

скопических корпусах. Обычно нет необходимости регулировать расстояние между электродами и зеркалом ванны, так как в вакууме электрическая дуга горит дольше. В результате электроды дольше сохраняют высокое качество, так как они не контактируют с жидким металлом или шлаком и не окисляются атмосферным кислородом. Энергия, поступающая в расплав от электрической дуги, предотвращает тепловые потери. Над электрической дугой в вакуумной камере возникает защитная тепловая зона, предотвращающая чрезмерный нагрев крышки камеры. Энергия, поступающая на поверхность расплава, разгоняет шлак в стороны и дает возможность газам покидать металл. Обработка плавки заканчивается после достижения требуемых показателей. Дальнейшее совершенствование вакуумно-дуговой нагревательной системы является следующим важным шагом в развитии ковшевого вакуумирования.

Проекты оборудования для проведения процессов вторичной металлургии разрабатывают с учетом множества факторов, важнейшими из которых являются генеральный план предприятия, схема грузопотоков и степень использования.

Оборудование для процессов вторичной металлургии должно быть интегрировано в структуру и генплан действующего предприятия черной металлургии. Размеры ковша, шаг колонн и высота установки мостовых кранов — все эти факторы также налагают ограничения на планировку оборудования для процессов вторичной металлургии. Данное оборудование должно быть интегрировано в существующую схему логистики и материальных грузопотоков. Длительность рабочих циклов предшествующих и последующих агрегатов также играет важную роль при проектировании отдельных компонентов оборудования вторичной металлургии.

Высокая готовность оборудования к работе, определяющая степень его использования, — один из важнейших факторов, которые принимаются во внимание при конструировании агрегатов и строительстве цеха. Степень готовности к использованию механического и электрического оборудования, которую можно прогнозировать с высокой точностью, служит показателем правильного конструирования и наличия достаточного опыта владельцев предприятия по эксплуатации подобного оборудования.

Концепция блочной (модульной) конструкции хорошо зарекомендовала себя при разработке оборудования различного назначения. Каждый модуль включает ряд взаимодействующих компонентов, которые можно считать независимыми функциональными группами, являющимися частями единого агрегата. Поэтому конструирование подобных агрегатов предусматривает выбор соответствующих модулей и их наилучшее объединение для выполнения конкретных задач.

Перемещение вакуумной камеры

Систему перемещения вакуумной камеры с помощью передаточной тележки используют в случае, когда камера находится вне зоны действия цеховых мостовых кранов или при сочетании агрегатов VHD или VD/VOD. Цеховые мостовые краны устанавливают каждый ковш на опоры внутри вакуумной камеры. Затем тележка с камерой и с ковшом перемещается под крышку вакуум-камеры. Крышка опускается на фланцы камеры, снабженные вакуумными уплотнениями.

Конструкция передаточной тележки для перемещения вакуумной камеры выполнена в соответствии с размерами ковша.

Система перемещения и подъема крышки камеры (рис. 1) применяется при использовании стационарных вакуумных камер. После установки цеховым мостовым краном ковша в камере крышка вместе с системой электродов перемещается в позицию над вакуумной камерой с помощью механизма перемещения. Затем с помощью механизма подъема-опуска крышка устанавливается на фланцы камеры. Для перемещения крышки применяют электромеханические, а также гидравлические приводы.



Рис. 1. Схема механизма перемещения и подъема крышки

В прошлом системы подъема крышки были оборудованы в основном гидравлическими приводами, прямо или косвенно связанными с подъемным механизмом. Большинство систем имели три цилиндра, ход которых синхронизировался посредством измерительных и пропорциональных клапанов. Однако на некоторых заводах к гидравлическим системам относились как к постоянной аварийной угрозе в цехе. В связи с этим конструкторы были вынуждены искать более безопасные решения. В результате получили развитие две следующие электромеханические концепции. Система с противовесом является альтернативой системе гидравлического подъема крышки. Подъем и опускание выполняются редукторным приводом, а также цепным устройством со звездочкой, передающим движение через полый вал, расположенный перпендикулярно направлению перемещения тележки с крышкой камеры. Через звездочки, расположенные на обоих концах полого вала, переброшены цепи, к концам которых подвешен противовес. Кронштейны крышки вакуумной камеры размещены на поперечных балках, которые закреплены на подъемном механизме. Использование противовесов позволяет значительно уменьшить требуемую мощность электропривода подъемного механизма, поскольку при расчете мощности учитывается не масса крышки, а только потери на трение и инерцию масс. Противовес является сравнительно простым техническим решением, преимущества которого особенно заметны при небольших усилиях закрывания крышки и в короткоходовых механизмах.

Подъем с помощью шпинделя является эффективной концепцией при больших усилиях закрывания крышки и для длинноходовых механизмов. От центрального привода через карданные валы и конические зубчатые передачи приводится во вращение шпиндель, выполняющий подъем и опускание крышки. Шпиндели рассчитаны на более высокие нагрузки и обладают дополнительной механической надежностью. Синхронизация системы осуществляется механически в корпусе шпиндельной головки. В этом случае не требуется резервировать площади для гидроустановки.

Система электродов

Для выполнения разделенных во времени операций подъема крышки и позиционирования электродов применяется обычная гидравлическая система с плунжерным цилиндром, работающим под давлением до 160 бар.

Плунжерный цилиндр с направляющей рамой непосредственно перемещает опорный рычаг вместе с телескопическим трубчатым (цилиндрическим) корпусом. Длина хода электродов составляет примерно 1600 мм.

В качестве альтернативного решения для позиционирования электродов может быть применен стандартный гидравлический цилиндр. Этот гидроцилиндр перемещает держатель по направляющим стойкам, закрепленным на крышке вакуумной камеры. Ход электрода при этом может быть увеличен примерно до 2500 мм.

Моральный и физический износ основного технологического оборудования, необходимость увеличения объемов производства продукции, улучшения ее качества за счет применения современных технологий и, соответственно, повышения уровня конкурентоспособности на внешних и внутренних рынках сбыта привели руководство ПАО «Энергомаш-спецсталь» к решению о модернизации существующих производственных мощностей.

В соответствии с этим ГП «Укргипромез» совместно с ПАО «ЭМСС» выполнил проект и рабочую документацию на модернизацию существующего сталеплавильного производства и объектов энергетического хозяйства. В объеме реконструкции электросталеплавильного цеха (ЭСПЦ) предусмотрено сооружение ДСП-70 и новой линии внепечной обработки стали в составе У КП-140 и У ВС-140 со вспомогательным и газоочистным оборудованием. Проект модернизации сталеплавильного производства позволит ПАО «Энергомашспецсталь» выйти на уровень передовых технико-экономических показателей по расходу сырья, материалов, энергоресурсов и экологических показателей, обеспечивая при этом качество продукции на уровне международных стандартов [5].

Сталеплавильное производство предприятия представлено электросталеплавильным цехом (ЭСПЦ) в составе ДСП-12, ДСП-50 № 1, ДСП-100 № 3, ДСП-199 № 5, установки ковш-печь (У КП), установки вакуумирования стали (У ВС). В объеме реконструкции ЭСПЦ предусмотрено сооружение ДСП-70 и новой линии внепечной обработки стали в составе У КП-140 и У ВС-140 со вспомогательным и газоочистным оборудованием, при этом сооружаются новые участки разлива стали в слитки. Предусмотрено расширение выплавляемого сортамента стали. Номенклатура отливаемых слитков весом от 3,6 до 420 т. С вводом в эксплуатацию новой ДСП-У КП-140 и У ВС-140 существующие печи ДСП-12, ДСП-50 № 1 и ДСП-100 № 3 выводятся из эксплуатации. ДСП № 5 остается в резерве и подключается к работе только в период аварийной остановки ДСП-70. Существующие установки внепечной обработки стали сохраняются в работе и в случае производственной необходимости подключаются к работе параллельно с сооружаемой новой линией внепечной обработки. Выпуск стали из сталеплавильной печи ДСП-70 предполагается проводить в существующие сталеразливочные ковши емкостью 130 т и новые ковши емкостью 140 т.

Отливка крупнотоннажных слитков будет осуществляться путем разлива спаренных плавов, при которой в один ковш (емкостью 140 т) производится выпуск двух подряд выплавленных в ДСП-70 плавов. Масса плавки, обрабатываемой на вновь устанавливаемых У КП-140 и У ВС-140, составляет 140 т (в новых сталеразливочных ковшах) или 70 т (в существующих сталеразливочных ковшах). Основное технологическое оборудование комплектно поставляется фирмой «CVS Makina», Турция.

Реконструкцию электросталеплавильного цеха предусматривается осуществить в три очереди в условиях действующего производства, с поэтапным сооружением основного технологического оборудования и производственных участков. Объем производства на первой и второй очередях строительства составляет 133,7 т слитков в год, третьей очереди строительства — 250 тыс. т в год.

Производительность ЭСПЦ первой и второй очереди ограничена существующими мощностями по переработке металлического лома и действующих воздуходелительных установок по производству кислорода. В первой очереди строительства сооружается дуговая сталеплавильная печь ДСП-70, установка внепечной обработки стали — ковш-печь У КП-140,

поставляемые комплектно с вспомогательным оборудованием и новой системой газоочистки. На второй очереди строительства проектом предусмотрено сооружение установки вакуумирования стали УВС-140 и организуется участок обслуживания и ремонта сталеразливочных ковшей в подготовительном отделении ЭСПЦ.

После выплавки стали производится ее разливка в ковш, установленный на самоходном сталевозе, посредством которого ковш передается в разливочный пролет, где краном устанавливается на сталевоз, который перемещает ковш в позицию обработки на УВП-140 или УВС-140. После обработки ковш с готовым металлом передается на разливку. Загрузка материалов в скраповозные бадьи, сталеразливочный ковш на выпуске или в процессе внепечной обработки осуществляется посредством единой системы хранения, дозирования и загрузки. Применение рациональных объемно-планировочных решений и современных технологий выплавки, внепечной обработки стали и очистки отходящих газов позволит сталеплавному производству ПАО «ЭМСС» выйти на уровень передовых технико-экономических показателей, обеспечивая качество продукции на уровне международных стандартов.

Электросталеплавильное производство машиностроительных заводов характеризуется широкой номенклатурой выпускаемой продукции и высокими требованиями к ее качеству, разнообразием типоразмеров и параметров применяемого оборудования. Значительная часть действующих дуговых печей относится к так называемой малотоннажной металлургии с высокими удельными расходными показателями и стесненными габаритами, затрудняющими вписывание новых узлов и механизмов.

Во многих случаях возникает задача увеличения массы производимых слитков в условиях ограниченных ресурсов и без существенных изменений инфраструктуры и логистики. При этом оборудование часто морально и физически устарело и требует замены или глубокой модернизации.

Очевидно, что второй путь значительно дешевле, так как не надо менять сложившуюся в цехе логистику, габариты участка, схемы подачи электроэнергии, воды, кислорода, системы удаления и очистки отходящих газов.

Основные направления и результаты глубокой модернизации оборудования сталеплавильного цеха показаны на примере АО «Тяжпромарматура». Основной задачей ставилось увеличить массу и повысить качество жидкого металла для получения высококачественных отливок массой до 35 т.

Для решения этой задачи было решено модернизировать три пятитонные печи типа ДС-5МТ, увеличив их емкость до 12 т и поставить установку печь-ковш, присоединив это оборудование к действующей электрической сети завода, запитанной от двух сетевых трансформаторов типа ТРДН-32000/110. Показатели качества электроэнергии в точке подключения электропечной нагрузки к электрической сети общего назначения по отклонениям, колебаниям, несинусоидальности и несимметрии напряжений во всех режимах работы ДСП и установки печь-ковш должны соответствовать требованиям ГОСТ 13109-97 [6].

Известно, что наиболее прогрессивным способом получения высококачественной стали является дуплекс-процесс, при котором доводку жидкого металла производят в печи-ковше, в котором в автоматическом режиме по заданной программе выполняются следующие операции:

- нагрев металла электрическими дугами;
- перемешивание металла инертным газом;
- подача в расплав алюминиевой проволоки или проволоки с наполнителем двухручьевым трайб-аппаратом;
- подача в расплав легирующих и шлакообразующих из бункеров с системой дозирования;
- замер температуры и окисленности металла.

В связи с тем, что сталеразливочные ковши емкостью 10–20 тонн имеют небольшой внутренний диаметр, стойкость футеровки в соответствии с критерием Швабе (R_{ϕ}) существенно снижается

$$R_{\phi} = \frac{P_{\text{дуг}} U_{\text{дуг}}}{a^2},$$

где: $P_{\text{дуг}}$ — мощность дуги; $U_{\text{дуг}}$ — напряжение на дуге; a — расстояние от электрода до стенки ковша.

При этом остро встает вопрос об использовании печи-ковша с малым диаметром распада электродов. Кроме этого, на стойкость футеровки сильное влияние оказывает равномерное распределение мощности по фазам.

Проанализировав конструкции агрегатов печи-ковша различных фирм, было принято решение о целесообразности использования печи-ковша емкостью 20 т с тремя электродами, перемещаемыми на одной общей траверсе, так как эта конструкция хорошо себя зарекомендовала на ОАО «ОЗММ», где с 2007 г. эксплуатируется 15-ти тонный агрегат типа АКОС-15, работающий по данной схеме (рис. 2) [6, 7], и имеет по сравнению с обычными установками ряд существенных преимуществ:

- упрощенную конструкцию и повышенную надежность;
- меньшую стоимость;
- уменьшенную индуктивность короткой сети за счет сближения и триангулирования ее элементов, не меняющихся на протяжении всего цикла;
- равномерное распределение мощности по фазам;
- сниженный расход на обслуживание механизмов;
- удобство обслуживания.



Рис. 2. Агрегат комплексной обработки стали в ковше емкостью 15 т с тремя электродами на одной траверсе

С целью унификации печи-ковша с действующим в цехе оборудованием в качестве механизма перемещения электродов целесообразно использовать электромеханический привод от модернизированной печи ДС-10И1, который оптимально подходит к условиям работы установки печи-ковша, так как в процессе ее работы электроды остаются практически неподвижными. Наличие данного сталеплавильного оборудования позволяет выплавлять разнообразные марки стали с высокими прочностными и пластическими свойствами, что

в свою очередь обеспечивает производство высококачественных конкурентоспособных изделий.

Опыт модернизации электросталеплавильного производства показывает, что при существующем многообразии технических задач можно выделить ряд технических решений, применимых как при реконструкции существующих цехов, так и при создании новых производств — размещение электродов агрегата ковш-печь на общей траверсе со значительным уменьшением диаметра распада электродов, что особенно важно для агрегатов малой емкости.

Технология производства высококачественной стали

В начале XX в. химический состав и прочность стали практически исчерпывали требования к ее качеству. Сегодня изменились не только эти нормы, в стандартах на сталь отражены многообразные требования технологии производства и эксплуатации машин и сооружений: штампуемость, обрабатываемость резанием, свариваемость, прокаливаемость, хладостойкость, коррозионная стойкость, стойкость к старению и многие другие.

Качество стали — характеристика многомерная, хорошо описываемая матрицей свойств, составов и т.д. Металл может оказаться непригодным даже тогда, когда не выполнено хотя бы одно из условий работоспособности. А выполнимость почти каждой из норм сегодня зависит не от одного агрегата или режима, а от всей технологической цепочки. Поэтому не только уровень, но и полный перечень обязательных материаловедческих и технологических норм для продукции — предмет обстоятельного анализа перед разработкой любых металлических изделий.

В этой связи современная технология производства высококачественной стали должна обеспечивать строгое соответствие технологических параметров заданным значениям. Для достижения этого в технологических указаниях должны быть оговорены каждый из этапов сталеплавильного передела: от подбора шихты до сдачи слитка. Ниже кратко рассмотрена общепринятая сегодня концепция технологии производства стали для ответственных изделий машиностроения. Технология должна быть основана на постоянном экспрессном контроле технологических параметров и направлена на получение заданного стандартного состояния металла перед разливкой, определяемого требованиями к свойствам готовой металлопродукции. Технологическая цепочка при этом должна обязательно включать следующие этапы:

- подготовка шихтовых материалов с целью обеспечения заданного содержания цветных и других неудаляемых примесей в конечном металле и снижения расхода электроэнергии (за счет подбора размеров компонентов шихты);
- получение полупродукта с заданным содержанием примесных и легирующих элементов, заданным содержанием углерода, активностью кислорода и, конечно, с заданной температурой;
- отсечка печного шлака при выпуске или на специальном стенде с целью предотвращения ресульфурации, рефосфорации и вторичного окисления;
- наведение нового высокоосновного шлака;
- максимально раннее после выпуска глубокое ($a_{\text{O}} < 10 \text{ ppm}$) раскисление металла;
- вакуумирование, причем если требуется глубокая десульфурация ($[\text{S}] < 0,002 \%$), то более предпочтительно ковшовое вакуумирование, где имеет место наиболее интенсивное и полное перемешивание металла со шлаком;
- если требуется достаточно продолжительная внепечная обработка, необходимо устройство для нагрева металла;
- обработка металла кальцийсодержащими материалами с помощью трайб-технологии;
- разливка металла из стандартного состояния (описываемого такими параметрами, как температура, окисленность и содержание водорода и азота) с обязательной защитой от вторичного окисления.

Детальные корректировки технологии определяются индивидуальными условиями предприятия. В любом случае, разработка комплексной технологии производства высококачественных марок стали для конкретного предприятия предполагает:

- проведение комплексного технико-экономического анализа проекта;
- выполнение проектно-конструкторских работ;
- обоснование и разработка оптимальных технологических решений и маршрутов;
- поставка необходимого набора оборудования;
- освоение оборудования, технологии и обеспечение ее устойчивой длительной эксплуатации (гарантийное и послегарантийное обслуживание);
- мировой уровень качества и конкурентоспособность выпускаемой продукции.

Ниже рассмотрены четыре основных этапа металлургического передела: подготовка шихты, выплавка, внепечная обработка и разливка (рис. 3). Рассмотренная схема относится к машиностроительным заводам, на которых плавление осуществляют в дуговых печах, а сталь разливают в слитки [7].



Рис. 3. Схема производства в литейных цехах машиностроительных заводов

Выводы

Разливка стали в слитки в объеме 5–15% в промышленно развитых странах сохранит свое значение в обозримом будущем. Возможность получения крупных слитков высокого качества является основой развития всех ведущих отраслей экономики. Для энергетического, химического и атомного машиностроения наибольшая масса отливаемых слитков в развитых странах неуклонно возрастает и достигает 650 т. Качество проката многих легированных сталей из слитков выше, чем из непрерывнолитой заготовки. Некоторые сорта высоколегированной стали не могут быть разлиты непрерывным способом. Современная технология получения слитков обладает широким набором средств для существенного улучшения качества слитков, многие из которых находят применение при непрерывной разливке: вакуумирование разливаемой струи, применение разнообразных шлакообразующих и теплоизолирующих смесей, введение микролегирующих и модифицирующих добавок, использование инертного газа для защиты струи металла от вторичного окисления и перемешивания расплава, непосредственное воздействие на кристаллизующийся металл электромагнитной индукцией, вибрацией и ультразвуком. Продолжается поиск новых вариантов технологии, основанных на различных физических принципах, их теоретическое и экспериментальное обоснование [8].

Внепечная обработка в сталеплавильных цехах машиностроительных заводов направлена на решение широкого спектра технологических задач.

При совпадении основного набора применяемого оборудования с традиционным металлургическим производством, его технологическими возможностями и параметрами, агрегаты внепечной металлургии в сталеплавильном производстве машиностроительных заводов характеризуются рядом особенностей:

- должны удовлетворять более жестким требованиям к макро- и микроструктуре готового металла, а также к содержанию примесей и качеству поверхности;

- широкий марочный сортамент, а также большой диапазон массы и размеров отливаемых слитков требуют высокой гибкости оборудования и его способности к оперативной перенастройке параметров;

- более сложные технологические задачи определяют способность металлургического производства машиностроительных заводов воспринимать и активно использовать новейшие тенденции и разработки;

- именно на машиностроительных предприятиях сосредоточено производство специальных сплавов, требующих применения средств специальной металлургии (электрошлакового, вакуумно-дугового, вакуумно-индукционного и электронно-лучевого переплава).

Список литературы

1. Дибров И.А. Состояние и перспективы развития литейного производства России // Литейное производство и металлургия. 2021. Беларусь. 29-я Международная научно-техническая конференция и информационная выставка: труды участников конференции / Белорусский национальный технический университет. Под общ. ред. Е.И. Маруковича, ред. С.В. Машканова [и др.]. Минск. БНТУ, 2021. С. 6–11.

2. Вакуумная металлургия. Под научн. ред. А.М. Самарина. М. Металлургиздат. 1962. 515 с.

3. Майоров А.И., Решетов В.И., Протасов А.И. Внепечная обработка стали в машиностроении // Тяжелое машиностроение. 1993. № 3. С. 21–24.

4. Обитц Й., Брок Д., Кристл Р. Возрождение технологии термовакuumной (вакуумно-дуговой) дегазации // МРТ. 2011. № 2. С. 22–28.

5. Степаненко А.Н., Филяк А.В., Малик А.А. и др. Реконструкция электросталеплавильного цеха в ПАО «Энергомашспецсталь» // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2014. № 1. С. 16–18.

6. Бершицкий И.М., Васильев В.В., Протасов А.В., Савалык Н.А. Опыт реконструкции электросталеплавильного производства машиностроительных заводов. «Неделя металлов в Москве», 10–13 ноября 2015 г. Сборник трудов конференций // М. ВНИИМЕТМАШ. 2016. С. 132–143.

7. Технология производства высококачественной стали // Лаборатория крупного слитка. URL: <http://steelcast.ru>.

8. Протасов А.В., Сивак Б.А., Смирнов Л.А. Рафинирование стали в процессе разливки. Вологда–Москва. «Инфра-инженерия». 2023. 328 с.

References

1. Dibrov I.A. (2021) *Sostoyaniye i perspektivy razvitiya liteynogo proizvodstva Rossii* [State and prospects for the development of foundry production in Russia] *Liteynoye proizvodstvo i metallurgiya* [Foundry and Metallurgy] BNTU [BNTU]. Minsk. Belarus.

2. *Vakuumnaya metallurgiya. Pod nauchn. Red. A.M. Samarina* (1962) [Vacuum metallurgy. Scientific editorship of A.M. Samarin] *Metallurgizdat* [Metallurgizdat]. Moscow. 515 p.

3. Mayorov A.I., Reshetov V.I., Protasov A.I. (1993) *Vnepechnaya obrabotka stali v mashinostroyenii* [Out-furnace processing of steel in mechanical engineering] *Tyazheloye mashinostroyeniye* [Heavy mechanical engineering]. No. 3. P. 21–24.

4. Obitz J., Brock D., Krystl R. (2011) *Vozrozhdeniye tekhnologii termovakuumnoy (vakuumno-dugovoy) degazatsii* [Revival of thermal vacuum technology (vacuum-arc degassing)] *MRT* [MRT]. No. 2. P. 22–28.
5. Stepanenko A.N., Filyak A.V., Malik A.A. et al. (2014) *Rekonstruktsiya elektrostaleplavil'nogo tsekha v PAO «Energomashspetsstal»* [Revival of the electric arc furnace shop in PJSC «Energomashspetsstal»] *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and mining industry]. No. 1. P. 16–18.
6. Bershitsky I.M., Vasilyev V.V., Protasov A.V., Savalyk N.A. (2016) *Opyt rekonstruktsii elektrostaleplavil'nogo proizvodstva mashinostroitel'nykh zavodov. «Nedelya metallov v Moskve», 10–13 noyabrya 2015 g.* [Experience in the reconstruction of electric arc furnace production of machine-building plant. «Week of metals in Moscow», November 10–13, 2015] *Sbornik trudov konferentsiy. VNIIMETMASH* [Proceedings of conferences. VNIIMETMASH]. P. 132–143.
7. *Tekhnologiya proizvodstva vysokokachestvennoy stali* [Technology of production of high-quality steel] *Laboratoriya krupnogo slitka* [Laboratory of large ingot]. Available at: <http://steelcast.ru>.
8. Protasov A.V., Sivak B.A., Smirnov L.A. (2023) *Rafinirovaniye stali v protsesse razlivki* [Refining of steel in the casting process] *«Infra-inzheneriya»* [Infra-engineering]. Vologda–Moscow. 328 p.