

**ЗНАНИЕ**

НОВОЕ  
В ЖИЗНИ,  
НАУКЕ,  
ТЕХНИКЕ

СЕРИЯ  
ТЕХНИКА

**А.А.Вертман**

**КАЧЕСТВЕННАЯ  
МЕТАЛЛУРГИЯ,  
ГОД 1999**

**4'80**



НОВОЕ  
В ЖИЗНИ,  
НАУКЕ,  
ТЕХНИКЕ

Серия  
«Техника»  
№ 4, 1980 г.

Издается  
ежемесячно  
с 1961 г.

**А. А. Вертман,**  
доктор технических наук

# КАЧЕСТВЕННАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ, ГОД 1999

Издательство  
«Знание»  
Москва  
1980

## СОДЕРЖАНИЕ

Количество или качество? . . . . .	3
Количество в качестве . . . . .	12
Новое в технологии и оборудовании для выплав- ки качественных сталей . . . . .	14
«Большая» порошковая металлургия . . . . .	44
Атомная металлургия . . . . .	51
Литература . . . . .	64

Вертман А. А.

В35 Качественная металлургия, год 1999. М.,  
«Знание», 1980.

64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Серия «Тех-  
ника», 4. Издаётся ежемесячно с 1961 г.)

В брошюре рассказывается о методах повышения качества  
металла, порошковой и атомной металлургии, плазменных про-  
цессах, электронно-лучевом переплаве, лазерной обработке,  
разливке под давлением и т. д. Анализируются перспективы  
развития металлургии к началу XXI века.

Брошюра рассчитана на широкий круг читателей, ,

31001

34.3

## Количество или качество?

В продукции черной металлургии обычно выделяют рядовой, массовый металл и металл с более высоким уровнем свойств — качественный. В перспективе такое деление, вероятно, постепенно исчезнет. Выступая на ноябрьском (1979 г.) Пленуме ЦК КПСС, товарищ Л. И. Брежнев отметил: «Не раз уже говорилось, что при достигнутом уровне производства металла главное направление дальнейшего развития черной металлургии — не столько количественный ее рост, сколько коренное улучшение качества и расширение сортамента металлопродукции».

Это указание в значительной мере и определило название предлагаемой вниманию читателя брошюры.

Длительное время потребности промышленности в металле удовлетворялись главным образом благодаря экстенсивному развитию металлургии. Эта тенденция отражена в росте так называемого душевого потребления стали — отношения производства стали в год (в кг) к количеству населения данной страны. Потребление стали на душу населения в мире составляло в конце 50-х годов около 100 кг, а к 1985 г. оно поднимется, как полагают, до 231 кг на человека.

Недавно производство стали в нашей стране превзошло 150-миллионный рубеж и превысило максимальный уровень, достигнутый когда-либо черной металлургией США, которая длительное время лидировала в этой отрасли промышленности. Но мы еще отстаем по душевому потреблению стали от Японии и США. Возникает естественный вопрос: до каких пределов возможно и целесообразно расширять объем производства черных металлов? Ведь помимо огромных капиталовложений, которые требует эта отрасль народного хозяйства для

своего существования и развития, имеется и другой аспект, связанный с истощением недр и загрязнением биосферы.

Как известно, экологические проблемы в современном мире стоят очень остро. Решение их — одна из крупнейших и неотложных задач человечества, что непосредственно влияет на стратегию и масштабы развития черной металлургии. Согласно прогнозам к 2000 г. в городах будет жить 80—85% населения земного шара. В СССР в городах сегодня проживает около 160 млн. человек (более 60% населения). Развитие черной металлургии тесно связано с градостроительством, опыт показывает, что вокруг современного металлургического предприятия возникает обычно город с населением 500—600 тыс. человек.

Собственный вклад черной металлургии в загрязнение среды обитания весьма значителен, хотя и не столь, как вклад энергетики или транспорта. Ухудшающим экологическую обстановку фактором является высокая концентрация производства, характерная для черной металлургии. Уже ныне большая часть стали в стране выплавляется лишь на 15 крупных предприятиях, расположенных, как это имеет часто место на небольшом расстоянии друг от друга. Полагают, что к концу века основную массу металла будут производить на заводах, с годовым производством 20—30 млн. т, т. е. вдвое большей мощности, чем ныне. В то же время завод полного цикла с годовой производительностью лишь в 10 млн. т выделяет 600 т пыли в сутки, 227 т соединений серы, 700 т окиси углерода. Даже на расстоянии 12 км от источника загрязнения 75% проб воздуха имеют содержание вредных веществ.

Большинство металлургических предприятий расположено в радиусе менее 3—4 км от жилых массивов. Поэтому концентрация пыли в них нередко в 10—14 раз выше нормы, из-за чего резко (на 40%) ослабляется солнечная радиация; ультрафиолетовая радиация ослабляется на 34% (в радиусе 4 км). В радиусе 3 км за сутки оседает около 4,0 г/м<sup>2</sup> мельчайшей пыли, причем вклад аглофабрик в общее загрязнение — 30%, энергоустановок — 40%. Системы очистки позволяют (теоретически) снизить пылевыведение на 1 млн. т мощностей с 350 до 25 т/сутки, выделение CO<sub>2</sub> — с 200 до 65 т, CO — с 400 до 320 т. Фактически выброс в атмо-

сферу вредных веществ выше как по причине неорганизованных выбросов (до 25%), так и из-за неэффективной работы многих очистных устройств. Пределы допустимых концентраций некоторых компонентов еще не выяснены полностью (например, окислов азота и тонких взвесей металлов).

Сложившаяся ситуация, безусловно, требует принятия радикальных решений, ибо объем годового производства на некоторых заводах скоро приблизится к 15—20 млн. т. Уже сегодня до 20% от суммы продаж продукции черной металлургии направляется во многих странах, например в Японии, на защиту окружающей среды. Правда, Япония и вообще страны, располагающие развитыми морскими коммуникациями, находятся в более выгодных условиях, чем континентальные: в той же Японии значительное количество предприятий построено на искусственных островах, удаленных от жилых массивов.

В последнее время вводятся и строгие ограничения на содержание в сырье вредных примесей, в частности серы, используются и весьма жесткие административные меры. Например, в Японии металлургическое предприятие обязано озеленить 25% своей территории и еще 25% территорий вокруг заводской площадки. В США виновные в загрязнении биосферы подвергаются штрафу в 25 тыс. долл., а при повторном нарушении санкции — вдвое строже.

Большая работа по охране биосферы проводится в СССР. Но требования экологии накладывают все новые ограничения на допустимый объем производства черных металлов. Вероятно, в недалеком будущем примеру энергетиков, которые по экологическим соображениям уже ограничили мощность станций на твердом топливе 3000—4000 МВт, последуют металлурги.

Следует иметь в виду, что при современных масштабах производства загрязнение биосферы носит глобальный характер, тонкая пыль металлургических заводов переносится на сотни и даже тысячи километров и длительное время находится в атмосфере. Это наряду с увеличением в атмосфере концентрации углекислого газа способствует развитию так называемого «тепличного» или «парникового» эффекта. Сжигание всевозрастающих количеств топлива уже повысило концентрацию  $\text{CO}_2$  в атмосфере на 10% (за 100 лет). Полагают, что к 2000 г.

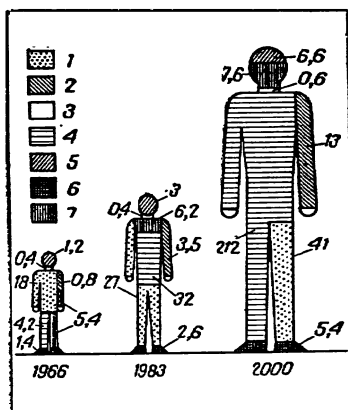
доля  $\text{CO}_2$  в атмосфере почти удвоится и достигнет 0,052%, что возможно приведет к увеличению средней температуры на 2,0—2,5°. Такой скачок температуры может иметь катастрофические последствия. Определенное значение для глобальных атмосферных явлений имеет и всевозрастающее использование кислорода в промышленности развитых стран, при прогрессирующем угнетающем действии промышленных отходов на флору и фауну.

Особо следует отметить загрязнение черной металлургией и горной промышленностью водного бассейна. Например, самой грязной рекой Европы стал Рейн (1162 км), который снабжает питьевой водой 25 млн. человек, а технической водой — практически всю черную металлургию ФРГ. Еще 20 лет назад расход воды на 1 т стали достигал 200 м<sup>3</sup>. Ныне этот показатель уменьшен до 30 м<sup>3</sup>, а на одном из французских заводов намереваются в ближайшее время достичь 1,0 м<sup>3</sup>/т. На современных предприятиях в идеале 95% использованной воды получают за счет ее рециркуляции и тщательной очистки сточных вод. Но и в этом наиболее благоприятном случае общий вынос вредных веществ (с учетом объемов производства) может достигать весьма значительных величин. Достаточно сказать, что по нормам, принятым в США, в сточных водах может содержаться до 5 кг/т масел, 2,5—3,0 г/т цианидов, 2,5—3,0 г/т фенола и т. д.

Итак, необходимо признать, что экология становится одним из основных факторов, требующих сократить экстенсивное развитие отрасли. Отсюда могут быть сделаны по крайней мере два вывода: необходимо либо изыскать заменитель черных металлов, либо, резко улучшив качество, снизить расход металла.

Рассмотрим возможности первого направления. Действительно, существует ли реальный заменитель стали, способный обеспечить снижение объемов производства? Наибольшие надежды еще совсем недавно связывали с синтетическими материалами. Во многих прогнозах даже указывались конкретные сроки, когда синтетические материалы вытеснят черные металлы. Так, согласно одному из них уже в 1983 г. производство пластмасс должно сравняться по объему с производством стали, а в 2010 г. — по весу. Темп роста производства синтетических материалов не имеет аналогов в истории тех-

Рис. 1. Изменение доли отдельных материалов в общем их потреблении на человека в год:  
 1 — железо; 2 — алюминий; 3 — медь и цинк; 4 — пластмассы; 5 — синтетическая резина; 6 — синтетические волокна; 7 — естественные волокна и резина



ники. В 1980 г. их, вероятно, будет произведено 105 млн. т (91 млн. м<sup>3</sup>). Если в настоящее время на черные металлы и синтетические материалы приходится соответственно 60 и 22% всех потребностей в конструкционных материалах, то к концу века, как полагают, доля первых сократится до 19%, а вторых возрастет до 78% (рис. 1).

Негативные прогнозы развития черной металлургии делаются не впервые. Академик Б. Е. Патон писал недавно в газете «Известия»: «Лет двадцать назад страницы газет и журналов обошла хлесткая карикатура — в одной упряжке идут могучий конь и жалкая костлявая кляча. На боку коня надпись «химия», а на кляче — «металлургия». Тогда многим казалось, что все верно — эра металлургии кончается, наступает эпоха синтетики. Но жизнь преподала серьезный урок — недооценка роли и значения металлургии в научно-техническом прогрессе спустя годы обернулась досадными просчетами и диспропорциями».

Трудности прогнозирования уровня мирового производства черных металлов часто связаны с недооценкой свойств стали, при явной переоценке возможностей некоторых заменителей. Это хорошо иллюстрируется изменением весового отношения сталь — цемент в США. В 1950 г. оно составляло 2,27, в 1960 г. — 1,73, в 1965 г. — 1,88, в 1970 г. — 1,81, в 1974 г. — 1,71. Практически во всех развитых странах за последние 25 лет картина

аналогична. Оказалось, что представления о превосходстве бетона над металлом в строительных конструкциях сильно преувеличены; металлоконструкции вновь теснят бетон и железобетон.

Это в значительной мере обусловлено тем, что уровень прочности рядовой стали ( $35\text{--}40\text{ кгс/мм}^2$ ) сильно отличается от теоретически возможной величины  $800\text{--}1000\text{ кгс/мм}^2$ . Резервы увеличения прочности и соответственно снижения расхода наиболее велики именно для черных металлов. Ныне уже налажено, например, массовое производство стали с пределом прочности  $80\text{--}250\text{ кгс/мм}^2$ , высокой вязкостью и хорошей свариваемостью. Это позволяет экономить  $30\text{--}40\%$  металла (для металла с пределом прочности  $100\text{ кгс/мм}^2$ ). Еще больше экономия (в  $7\text{--}10$  раз) при использовании высокопрочной проволоки ( $150\text{--}400\text{ кгс/мм}^2$ ) для обмотки колон прессов и других тяжело нагруженных узлов.

В целом можно констатировать, что благодаря уникальному сочетанию высокой прочности и технологичности при относительно низкой стоимости и весьма низком расходе энергии черные металлы успешно сопротивляются натиску новых конструкционных материалов. Более того, позиции их в последнее время даже укрепились. Как известно, потребление энергии в развитых странах удваивается каждые  $8\text{--}10$  лет, причем в первую очередь расходуются наиболее ценные виды топлива — природный газ и нефть. Считают, что при нынешних темпах потребления мировых запасов нефти надолго не хватит. Дефицит нефти и газа непременно скажется на стоимости синтетических материалов, изготавливаемых из этих продуктов.

К тому же пластмассы отличает крайне низкий коэффициент рециркуляции, что приводит к накоплению отходов и создает дополнительные проблемы. Черные же металлы по этому показателю уступают лишь свинцу, причем сокращение фактических потерь отходов чугуна и стали связано в основном лишь с рациональной организацией сбора и переработки лома. Переработка же пластмасс, напротив, — одна из серьезных и нерешенных проблем современности. Существенно уступают металлам синтетические материалы и в отношении сроков службы в различных условиях эксплуатации.

Более благоприятная ситуация с металлическими ма-

териалами, из которых наиболее вероятным заменителем стали может стать алюминий.

Алюминий и его сплавы уже нашли широкое применение не только в самолетостроении, но и в электротехнике, автомобиле- и вагностроении, строительстве, производстве товаров народного потребления, в консервной промышленности. Ожидают, что мировое производство его в 1980 г. достигнет 17—22 млн. т. Оно удваивается каждые 10—11 лет. Известно, что алюминия в земной коре содержится больше, чем железа, однако разведано запасов кондиционных бокситов пока недостаточно. Тем не менее несмотря на дефицит бокситов, перспективы развития производства алюминия оцениваются специалистами как весьма позитивные, ибо по мере строительства атомных электростанций снижается стоимость электроэнергии, на долю которой падает до 20% стоимости алюминия. По мнению академика А. И. Целикова, темпы роста производства алюминия на перспективу должны существенно опережать темпы роста черной металлургии и быть не ниже 8—10% в год. Только в этом случае можно изменить соотношение алюминий — сталь, которое составляет ныне, например, в США лишь около 35 кг/т и до конца века, вероятно, возрастет не более чем вдвое, т. е. даже резкое увеличение производства алюминия не может существенно сократить потребность в черных металлах. Не случайно по оценкам ООН до конца века доля черных металлов в общем производстве конструкционных материалов сократится всего на несколько процентов.

Итак, читателю ясна вся сложность сложившейся обстановки. Еще нет материалов, способных эффективно заменить сталь. При всевозрастающем спросе на черные металлы экология резко ограничивает экстенсивное развитие металлургии. В условиях СССР, страны, строящей коммунизм, высшая цель экономики — наиболее полное удовлетворение растущих материальных и культурных потребностей трудящихся, воспитание здорового, гармонически развитого поколения. Поэтому экологическому фактору у нас уделяется несравненно большее внимание, чем в капиталистическом мире, проводящем политику «экологической эксплуатации» слабо развитых стран, выноса опасных производств на чужую территорию.

В этой ситуации реальны лишь два стратегических

направления. Одно из них требует создания таких процессов производства и обработки металла, которые позволили бы резко снизить как абсолютный, так и удельный расход металла. Это направление активно развивается, оно доказало свою не только экологическую, но и экономическую целесообразность. Партия неоднократно указывала, что главной задачей в развитии черной металлургии является не столько рост объемов производства, сколько коренное улучшение качества металлопродукции и ее структуры.

Второе направление еще только зарождается. Оно связано с созданием полностью безотходных и экологически безопасных процессов получения черных металлов, обеспечивающих комплексную переработку сырья. Практика здесь требует радикального изменения технологии, создания принципиально нового оборудования. Тем не менее именно за подобными процессами — будущее.

В первом случае, очевидно, основные усилия должны быть сосредоточены на снижении материалоемкости, так как черная металлургия в силу специфики производства отличается значительными расходами сырья и других материалов. Особое значение имеет снижение расхода чугуна и соответственно сырья, необходимого для его выплавки. Доля затрат на сырье и основные материалы в металлургии в 1955 г. составляла 42%, в 1970 г. — 56,5%, а ныне эта цифра еще более возросла, так как изменение геологических условий доступности сырья привело к удорожанию, например, руды в последние годы на 34%. К тому же с каждым годом приходится переходить на использование менее богатых руд, а также на применение более дорогих коксующихся углей. Это влияет на увеличение доли затрат в стоимости продукции черной металлургии, вынуждает более 84% всех добываемых руд обогащать. Увеличение доли обогащаемых руд, а обогащается не только железная руда, но и другое сырье, заставило увеличить мощности машиностроения, энергетики и других отраслей, обслуживающих сырьевую промышленность.

Советский ученый И. Г. Пашко отметил, что «машиностроение в настоящее время в основном работает на сырьевые отрасли, значительная часть его продукции используется в других отраслях и лишь 8% идет на удовлетворение потребностей населения».

Снижение материалоемкости и в первую очередь объемов добычи железной руды, коксующихся углей, добываемых, как правило, в шахтах глубокого залегания, имеет для условий СССР особое значение, так как большая часть металлургического топлива залегает восточнее Урала, а основные запасы железных руд — в районе КМА, что обуславливает необходимость дальних железнодорожных перевозок. Так, новый металлургический завод, намечаемый строительством в г. Старый Оскол Курской области, будет работать на коксующихся углях Кузнецкого бассейна, расположенного на расстоянии более 4200 км. Дальние железнодорожные перевозки на расстояние в несколько тысяч километров тяжелым бременем ложатся на экономику черной металлургии, загружают машиностроение изготовлением дополнительного подвижного состава, повышают расход топлива и электроэнергии. Не случайно почти все новые металлургические заводы, построенные в Японии, Франции и других странах, сооружены на морском побережье, ведь стоимость доставки сырья морем непрерывно снижается, так как растет грузоподъемность рудовозов (уже имеются суда, перевозящие за рейс 200—300 тыс. т руды). Подсчитано, что доставка руды по железной дороге на расстояние 1860 км вдвое дороже, чем перевозка руды морем на расстояние 21 800 км. В качестве любопытного факта отметим, что ныне рассматривается даже проект доставки руды из Бразилии в Европу на парусных судах грузоподъемностью до 20 000 т, что гарантирует минимальные транспортные издержки.

Или, например, увеличение производительности труда при гидротранспорте сырья в виде пульпы. Пульпопровод длиной 160 км имеет производительность 4000 т/ч, причем на этой операции занято всего несколько человек.

Мы привели эти факты для того, чтобы подчеркнуть, сколь важна в условиях СССР борьба за снижение материалоемкости. Ибо специфические условия континентальной страны с суровыми природными условиями требуют существенно больших затрат, большего отвлечения трудовых ресурсов, чем например, в Японии или США, также крупнейших производителей черных металлов.

Известно, что по сравнению с остальными способа-

ми получения стали расход материалов и трудовых затрат меньше у электроплавки в мощных дуговых сталеплавильных печах. В электросталеплавильном производстве в последние годы, несомненно, достигнуты выдающиеся успехи. Доля металла, выплавленного в электропечах, непрерывно растет и приближается, в некоторых странах к 20%. Этому способствует увеличение так называемого металлофонда, т. е. количества металла, накопленного данной страной. Бурно растет металлофонд и в СССР, к концу 1975 г. он достиг 1,2 млрд. т. Столь значительный металлофонд создает надежную базу для развития переплавных процессов электрометаллургии, позволяет снизить потребность в чугунах. Но... требуется все больше и больше электроэнергии. Правда, благодаря сооружению большегрузных печей затраты электроэнергии на выплавку тонны металла существенно снизились и составляют ныне 480—500 кВт·ч/т, тем не менее электроэнергия еще лимитирует развитие этого прогрессивного направления (особенно в европейской части СССР, которая потребляет почти 75% всей производимой энергии). Положение может радикально измениться при осуществлении грандиозной программы строительства атомных станций, намеченной XXV съездом КПСС. Можно с уверенностью сказать, что оптимизация структуры черной металлургии, снижение ее материалоемкости и отрицательного экологического эффекта непосредственно связаны с развитием атомной энергетики.

«Жизнь,— пишет Б. Е. Патон,— заставляет перенести центр тяжести на резкое повышение качества стали и проката, на существенное расширение их сортимента». Поэтому основную стратегическую концепцию развития черной металлургии кратко можно сформулировать так: «Количество — в качестве».

## Количество в качестве

Эта установка «количество — в качестве» четко сформулирована в «Основных направлениях развития народного хозяйства СССР на 1976—1980 годы». В них поставлена задача «значительно улучшить качество, расширить сортимент металлопродукции и сэкономить за счет этого в 1980 году в народном хозяйстве 5—6 млн. т металла. Увеличить в 1,5—2 раза выпуск эф-

фективных видов металлопродукции». Вопросы улучшения качества продукции давно уже находятся в центре внимания и хорошо знакомы читателю. Поэтому мы приведем лишь несколько наиболее важных фактов.

Удельный вес материальных затрат в машиностроении составляет 70%, а в черной металлургии доходит до 80%. Снижение материалоемкости в этих отраслях дает наибольший народнохозяйственный эффект. Например, снижение массы автомашин на 100 кг за счет лучшего качества материалов экономит 1 л топлива и соответствующее количество смазочных материалов. В результате улучшение сортамента оказывается экономически в три раза выгоднее, чем простое увеличение количества металла.

Как отмечает И. Г. Пашко, в последние годы существенно снизилась металлоемкость турбин и тепловозов (на 28—30%), новые пахотные тракторы Т-150 и Т-150К имеют удельную металлоемкость 44 кг/лс вместо 75,5 кг/лс у трактора Т-74 того же класса. Число таких примеров можно умножить, причина же тому — расширение сортамента и увеличение доли экономичных видов проката: холоднокатаного листа, гнутых профилей, проката с термоупрочняющей обработкой, труб и т. д.

Вместе с тем черная металлургия и машиностроение располагают еще крупными резервами. Ныне в СССР на единицу национального дохода расходуется (по данным И. Г. Пашко) в 1,5 раза больше черных металлов, чем в США, а доля конечного продукта в валовом общественном продукте составляла в 1960 г. 50,3%, в 1965 г. — 48,3, в 1970 г. — 47,6, в 1975 г. — около 46%.

Академик А. И. Целиков оценивает годовой резерв экономии черных металлов в машиностроении величиной порядка 10 млн. т. Резервы черной металлургии еще выше, поскольку новые металлургические процессы как-то: непрерывная разливка, внепечная обработка, производство экономнолегированных сталей, порошковая металлургия и др. — требуют втрое меньших капитальных вложений, чем наращивание объемов производства от руды и угля до готовой продукции.

Снизить металлоемкость можно, и уменьшив долю литья и поковок, ибо тут мы имеем дело с наименьшим выходом годного. Кроме того разброс величин основных параметров литья и поковок иного выше такового у про-

ката. Это вынуждает конструкторов предусматривать большой запас прочности. Ограничены и возможности технологии, особенно при обработке резанием. В упомянутой уже работе И. Г. Пашко приводится пример детали, заготовка для которой в 6 раз тяжелее конечного изделия.

По данным ЦСУ СССР коэффициент использования металла в машиностроении составляет 0,73 и по готовому прокату — 0,7 против 0,85 и 0,83 в США. В известной мере потеря этих 12% металла связана с преобладанием у нас пока метода резания над безотходными технологиями: прессованием, накаткой, выдавливанием, штамповкой, сваркой, пайкой, склеиванием и др. Производство чугунного и стального литья к выпуску готового проката составляет в СССР 27,5%, в ФРГ — 14, в Японии — 8,5%. В то же время приведенные затраты на создание мощностей на тонну стальных отливок — 750 руб., чугуновых — 600 руб., штампованных изделий из листа — 400 руб. Однако доля листа в производстве проката в СССР пока 38%, хотя производство листа у нас развивается весьма интенсивно. Увеличение производства листа особенно важно для машиностроения, так как наличие этого вида металлопродукции позволяет чуть ли не на 50% снизить количество отходов.

Итак, основная задача черной металлургии на перспективу — снижение материалоемкости в целом. Здесь мы не только получим наибольшую экономию средств, но и облегчим экологическую ситуацию, сэкономим сырье, материалы, производственные фонды.

Каким же конкретно арсеналом средств обладает и будет обладать технология для решения этих важнейших задач?

## **Новое в технологии и оборудовании для выплавки качественных сталей**

Можно с уверенностью сказать, что к началу нового века сохранится большинство освоенных ныне процессов. Изменяются лишь соотношения отдельных методов в промышленности (т. е. ее структура) и параметры

агрегатов. Следует, однако, отметить, что прогнозирование направлений и темпов научно-технического прогресса — крайне сложная задача вообще, а для такой многофункциональной системы, как черная металлургия, в особенности.

Например, в 1972 г. предполагали, что мировое потребление металлизированных материалов в сталеплавильном производстве к 1975 г. превысит 11,0 млн. т; фактически было произведено 5,2 млн. т. Весьма оптимистические прогнозы делались еще несколько лет назад относительно перспектив развития непрерывных процессов производства стали. Тогда (1960 г.) полагали, что уже к 1975 г. будет освоено промышленное производство стали в агрегатах непрерывного действия с годовой производительностью в миллионы тонн; жизнь, увы, опрокинула эти прогнозы. По нашему мнению, основная причина малой достоверности прогнозов в области черной металлургии заключается в большинстве случаев в том, что авторы прогнозов игнорируют достижения теории, которые позволяют по крайней мере оценить предельные возможности того или иного способа. Именно поэтому ниже мы кратко опишем лишь те способы производства, уровень которых еще далек от пределов, установленных теорией, и которые имеют бесспорные перспективы развития.

**Выплавка качественных сталей в дуговых печах.** Способ обеспечивает выплавку наибольшего количества стали повышенного качества и интенсивно развивается. Доля стали, выплавляемой в электропечах, достигла в капиталистических странах в 1974 г. 19,4% (ср.). Общее производство стали увеличилось в 1960—1974 гг. в развитых странах в 2,5 раза, а электростали — в 3,5 раза.

В технологии современной электроплавки просматриваются две основные особенности: использование все более мощных трансформаторов и перенос процессов рафинирования в специальные внепечные агрегаты. Эти тенденции сохранятся и впредь. Еще несколько лет назад считали для 100-тонной печи вполне достаточным трансформатор мощностью 44 МВт (440 МВ/т). Практика показала возможность увеличить удельную мощность до 760 и даже до 1000 кВт/т, что привело к удвоению производительности печи. Ныне более корректно классифицировать печи уже не по величине садки, а по часовой производительности.

Одновременно с мощностью трансформаторов возросла и емкость электродуговых печей. Две крупнейшие в мире электропечи имеют емкость по 360 т, оснащены трансформаторами мощностью по 162 МВт. В СССР действуют 200-тонные печи. Создан и трансформатор мощностью 125 МВт. Существенно изменились электрические параметры печей. Вторичное напряжение на крупных печах достигает 850 В и, вероятно, возрастет до 1000 В.

Как известно, электроды являются «узким» местом в электрометаллургии, их расход в лучшем случае 4,5—5,5 кг/т, а допустимая плотность тока всего 20—25 А/см<sup>2</sup>. На крупных печах диаметр электродов уже достиг 700 мм, что усложняет конструкцию. Но и в электродном производстве достигнуты большие успехи. Созданы электроды, рассчитанные на ток 100 кА. Не достигнут и предел возможностей материала электродов.

Важно подчеркнуть, что современный уровень техники позволяет создать электропечь емкостью 600 т и даже 800 т. Это утверждают специалисты завода «Сиб-электротерм». Но нужны ли столь крупные печи? Крупнейшие в мире 360-тонные печи дают по 3000 т стали в сутки, т. е. более 1,0 млн. в год при расходе энергии 480—500 кВт·ч. Печи емкостью 800 т могут выплавлять в год до 3,0—3,1 млн. т. Для надежной работы цеха в нем должно быть не менее трех печей, т. е. производительность подобного цеха сверхмощных печей будет приближаться к 10,0 млн. т, а потребность в энергии составит  $4,8 \cdot 10^9$  кВт·ч. Производительность может еще более возрасти (на 20—30%), если скрап предварительно нагревать газом до 800—1000°C, как это практикуется на некоторых зарубежных предприятиях.

Итак, современный уровень техники в принципе позволяет создать крупный металлургический завод с годовой производительностью 10,0—12,0 млн. т, на котором вся сталь будет выплавляться в электропечах, без использования чугуна, руды, кокса. Конечно, такие предприятия имеют неоспоримые экологические преимущества, производительность труда на них максимальная. Эволюция технологии, вероятно, приведет именно к такому типу заводов. Однако на этом пути имеются и

значительные препятствия. Одно из них — обеспечение мощных электропечей качественным сырьем.

Таким сырьем в перспективе станут металлизированные окатыши. В Советском Союзе уже сооружается крупнейший в мире электрометаллургический комбинат в г. Новый Оскол, производительность которого при полном развитии достигнет 5,0 млн. т окатышей в год. Темпы роста изготовления металлизированных (39—97%) окатышей в мире весьма высоки: полагают, что к 1980 г. их производство возрастет до 65 млн. т (с 5,2 млн. т в 1974 г.), а к 1985 г. — до 125 млн. т.

И все же выпуск даже столь значительного количества этого нового вида металлургического сырья не решит проблему снабжения мощных печей шихтой. По-прежнему важное значение будут иметь традиционные исходные материалы, прежде всего лом. Увеличение объема и мощности печей ни в коей мере не снижает требований к исходному сырью. Напротив, требования становятся более жесткими. С увеличением мощности, естественно, возрастает и цена времени. Поэтому операция завалки лома в большегрузные печи должна быть максимально короткой, значит необходим скрап, однородный по составу, размерам.

В перспективе значимость подготовки исходных материалов еще более возрастет, ибо по мере расширения сортамента увеличивается и загрязненность лома, возвращаемого на переплав. Все больше становится в шихте меди, никеля, цветных металлов, которые не удаляются в процессе переплава. Загрязнение скрапа — устойчивая тенденция, поскольку ныне уже известно свыше 8000 марок стали, а каждый год разрабатываются все новые и новые составы.

Устойчива тенденция и к увеличению доли листовых отходов, в том числе и листа с покрытиями цинком, свинцом, алюминием, полимерами. Это также существенно осложняет подготовку исходных материалов, так как их приходится перед завалкой не только компактировать, но еще и обжигать, улавливая отходящие газы. Уже в настоящее время компактирование отходов (пакетирование) накладывает ограничения на технологию, так как даже лучшие прессы дают плотность пакета всего около 1 т/м<sup>3</sup>, т. е. в 100-тонные печи нужно загрузить шихту объемом несколько десятков кубометров.

Итак, ясно, увеличение объема и мощности печей

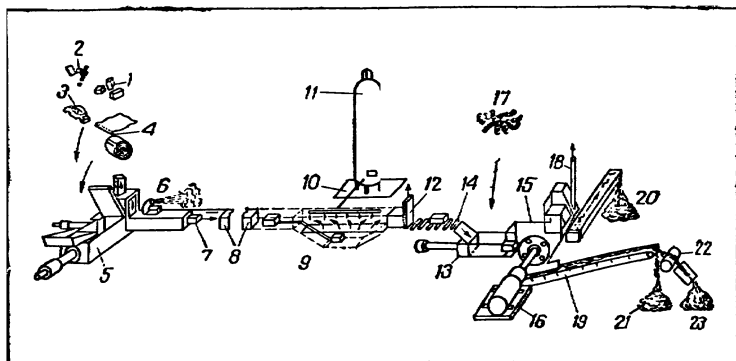
неразрывно связано с реконструкцией подготовки производства. И здесь сделано многое. Созданы, например, так называемые фрагментирующие шреддинг-установки, т. е. мощные молотковые дробилки с производительностью до 70—100 т/ч: лом дробится до кусков в 25—100 мм, а затем с помощью магнитной сепарации цветные металлы отделяются от черных. Правда, такие установки расходуют значительные мощности. Это заставило разработать еще один процесс измельчения предварительно охлажденного лома (рис. 2).

Охлаждение осуществляют жидким азотом (расход около 0,3 т/т) до минус 90—150°C, что позволяет снизить мощность привода дробилок с 6,2—6 тыс. лс до 500 лс. Качество скрапа улучшается, его насыпной вес достигает 2,8—3,1 т/м<sup>3</sup>. Правда, жидкий азот стоит довольно дорого, но по мере снижения стоимости электроэнергии его цена также будет падать. Это убеждает, что криогенный способ подготовки лома, безусловно, перспективен. К тому же чтобы охладить лом до —90°, все не обязательно пользоваться только жидким азотом. Уже известны и опробованы мощные воздушные турбоагрегаты, их внедрение существенно снизит стоимость охрупчивания.

Необходимо также упомянуть о попытках работы на так называемой «жидкой закалке», т. е. на предварительно расплавленной шихте. Применение способа позволяет вдвое сократить продолжительность плавки, более точно контролировать состав шихты, оптимизировать загрузку трансформаторов, снизить расход электродов. Этот способ пока не нашел широкого применения главным образом из-за организационных осложнений и отсутствия надежного высокопроизводительного агрегата для расплавления лома.

Резюмируем: выплавка стали в дуговых электропечах — наиболее надежный и результативный способ улучшения качества металла общего назначения; широкому его внедрению препятствуют дефицит электроэнергии и некоторые другие факторы. Однако многие из них, как мы пояснили выше, в настоящее время устраняются.

**Плазменные печи.** Новый и весьма перспективный металлургический агрегат впервые в мире был освоен промышленностью СССР. Самая крупная плазменная печь емкостью 30 т изготовлена в СССР и работает в



**Рис. 2.** Схема установки для криогенной переработки легковесного скрапа производительностью 25 т/ч:

1 — стальные пакеты; 2 — непакетированный скрап; 3 — кузова автомобилей; 4 — листы и рулоны; 5 — гидравлический или механический пресс; 6 — сопло для подачи газообразного азота; 7 — встречный поток газообразного азота; 8 — криогенный туннель, участок предварительного охлаждения; 9 — то же, участок окончательного охлаждения в ванне с жидким азотом; 10 — трубопровод подачи жидкого азота; 11 — танк для хранения жидкого азота; 12 — выходная дверь туннеля; 13 — механический или гидравлический толкатель; 14 — рольганг; 15 — дробилка; 16 — двигатель дробилки; 17 — стальная стружка; 18 — вытяжная труба; 19 — конвейер стальной части скрапа; 20 — крупные куски цветных металлов и отхода; 21 — мелкие куски цветных металлов; 22 — магнитный сепаратор; 23 — готовый скрап

ГДР. По конструкции она почти аналогична дуговой, с той лишь разницей, что вместо графитированных электродов энергия подводится к ванне с помощью плазмотронов. Использование в качестве источника тепла дугового разряда, стабилизированного потоком газа, имеет много технологических преимуществ. В частности, при использовании в качестве плазмообразующего газа аргона плавка протекает в нейтральной атмосфере без окисления, что позволяет переплавлять в плазменных печах стружку и отходы. Плотность тока дуги в плазмотронах достигает  $100 \text{ А/мм}^2$ , а температура —  $5\text{--}10 \cdot 10^4 \text{ К}$  эффективный; КПД плавильных плазмотронов — 70—80 %.

В качестве плазмообразующего газа может применяться не только аргон, но и азот, углекислый газ. Известны устройства, работающие на воздухе, паре.

Пока предельная мощность плазмотронов не высока, а ресурс — 100—300 ч. Подавляющее их большинство работают на постоянном токе, что связано с известными осложнениями, поэтому ведутся интенсивные работы по

созданию плазмотронов переменного тока. Задача сложная, ибо вследствие периодического изменения полярности дуга переменного тока менее стабильна. Однако уже созданы металлургические плазмотроны переменного тока на 750—3000 А и, конечно, будут созданы еще более мощные. Специалисты в области электрометаллургии считают возможным создание уже в ближайшей перспективе плазменных печей емкостью 100—150 т.

Можно полагать, что к концу века значительная доля электростали будет выплавляться в плазменных печах, хотя ныне она не сопоставима с долей стали, выплавляемой в дуговых (электродных) печах. К такому выводу приводит анализ особенностей технологического процесса.

То обстоятельство, что электроды не контактируют с ванной, позволяет выплавлять в плазменных печах особо низкоуглеродистые марки стали, потребность в которых непрерывно увеличивается. Известно, что коррозионная стойкость нержавеющей сталей резко (в 10—20 раз) возрастает при снижении содержания углерода с 0,06 до 0,02%. Добиться столь низкого содержания углерода значительно проще в плазменной печи. Очень интересно в плане улучшения качества стали и так называемое плазменно-водородное раскисление. Цель его — уменьшить количество кислорода, растворенного в металле. Продукт суммарной реакции водородного раскисления — пары воды, которые удаляются в газовую фазу. Использование же других раскислителей (кроме углерода) неизбежно загрязняет металл неметаллическими включениями. Эксперименты показали, что с помощью оргоно-водородной смеси при определенных условиях можно удалить до 96% кислорода; конечно, это положительно влияет на качество металла.

Во многих случаях, чтобы снизить расход ценных легирующих, например никеля, в сталь вводят азот. Но для этого сначала нужно выплавить специальные азотированные ферросплавы. Стало быть, существенно удорожается и усложняется производство. В плазменных печах можно производить легирование азотом непосредственно из газовой фазы. При содержании азота в плазмообразующем газе порядка 20% в некоторых сплавах удастся получить его, что вдвое больше, чем содер-

жание азота в стали, полученной при использовании ферросплавов.

В заключение отметим, что у плазменных печей очень низкий уровень шума, что также одно из их достоинств.

Анализ тенденций развития металлургии, как мы уже говорили выше, убеждает в неизбежности замены современных способов массового производства стали (мартеновский и конвертерный процессы) электрометаллургическими (плавка в дуговых и плазменных печах).

Параллельно с совершенствованием плавильных агрегатов интенсивно развивается и второе направление: расчленение технологии на отдельные этапы, реализуемые в специальных агрегатах. Ныне известно уже значительное число различных приемов обработки стали вне печи. Эти приемы обобщенно называют «внепечной обработкой». Пионером в области внепечной обработки был советский инженер А. С. Точинский, который еще в 20-х годах обрабатывал сталь специально подготовленным шлаком.

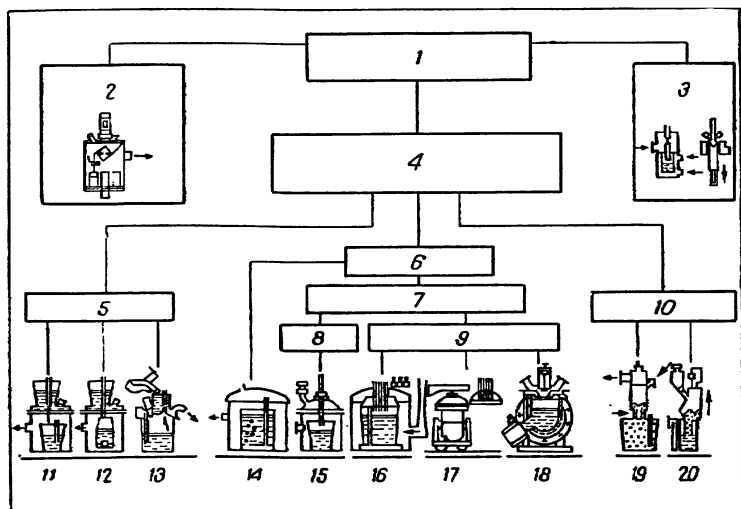
**Внепечная обработка.** Основные способы внепечной обработки следующие: вакуумирование, продувка металла газами, обработка синтетическим шлаком, внепечной нагрев. Как правило, используют комбинации способов, например, сочетают вакуумирование с нагревом или продувкой газами. При создании агрегатов и технологии внепечной обработки, по сути, решают ту же задачу, что и при разработке конвейера в машиностроении: последовательное выполнение операций на специализированном оборудовании. В настоящее время практически уже не строят цехи, в которых не осуществляется та или иная обработка вне печи. Это открыло перед технологами широкие возможности интенсификации производства. Производительность цеха, снабженного, например, устройством для вакуумирования и нагрева (печь — ковш), возрастает на 20—30%. Но не это главное. Главное — резко улучшается качество металла. Кроме того, отметим еще одно достоинство — в электропечи можно выплавлять только основу сплава, например чистое железо, а все нужные добавки вводить вне ее в оптимальных условиях (перемешивание, нагрев и пр. Такую технологию иногда называют «технологией бульона». Точно и кратко подобная стратегия сфор-

мулирована в следующем тезисе: «печь только для расплавления».

Внепечная обработка стали интенсивно развивается и, конечно, не только сохранится к концу века, но и оформится в совершенный способ улучшения качества металла. Рассмотрим кратко наиболее перспективные приемы внепечной обработки.

**Вакуумирование.** Способ впервые был предложен в СССР. При уменьшении внешнего давления уменьшается растворимость газов (аналогично тому, что происходит, когда мы открываем бутылку шампанского). Современные вакууматоры позволяют снизить давление над расплавом до 0,1—0,5 мм рт. ст. Наиболее полно удаляется водород, растворенный в стали, ибо он наиболее подвижен. Водород — виновник многих дефектов, особенно такого серьезного, как флокены (мелкие трещины, расходящиеся, как правило, от центра в виде лепестков цветка, отчего подобное название). Флокены часто выявляются не сразу, а в процессе эксплуатации, например, рельсов. Целый ряд тяжелых железнодорожных катастроф произошел из-за флокенов, которые не удалось своевременно обнаружить. Чтобы избежать их появления, приходится подвергать металл специальной длительной обработке (томлению). Для массивных изделий, например, для заготовок валов энергомашин продолжительность томления достигает 600—800 ч. Вакуумирование практически исключает противоблохенную обработку. США располагают вакуумными установками, позволяющими обработать 20% от общего производства. Существует много конструкций вакууматоров, но наибольшими преимуществами обладают конструкции, показанные на рис. 3.

Существенный недостаток вакуумирования — значительная потеря температуры в процессе обработки. От этого недостатка свободен вакууматор с дуговым обогревом. С помощью дуги не только компенсируют потерю температуры, но и при необходимости разогревают металл. Вакууматоры такого типа успешно используются на отечественных заводах и, конечно, перспективны. Достоинство комбинирования вакуумирования с интенсивным нагревом — возможность существенной экономии огнеупорных материалов, так как внепечной нагрев позволяет выпускать металл из печи при более низкой температуре. Бережное отношение к огнеупорам стано-



**Рис. 3.** Схематическая классификация процессов вакуумной обработки стали:

1 — вакуумная обработка стали; 2 — плавка, отливка и затвердевание в вакууме; 3 — вакуумный переплав; 4 — вакуумная обработка жидкой стали; 5 — обработка в струе; 6 — ковшевая обработка; 7 — с дополнительным обогревом; 8 — с химическим; 9 — с физическим; 10 — обработка отдельными порциями; 11 — дегазация при переливе из ковша в ковш; 12 — отливка слитка в вакууме; 13 — дегазация при выпуске; 14 — дегазация ковша с металлом, установленного на стенде; 15 — вакуумное рафинирование; 16 — дуговой обогрев под вакуумом; 17 — индукционные катушки под вакуумом, подогрев в воздухе; 18 — желобная индукционная печь; 19–20 — процесс циркуляционного вакуумирования

вится с каждым годом все более насущной проблемой, так как ремонт печей связан с затратой тяжелого ручного труда.

Интересное устройство для одновременного вакуумирования и нагрева металла используется на шведских заводах, где применяют так называемые индукционные каналные печи. Эти печи отличает высокий КПД (75% против 50% у тигельных индукционных печей). Их емкость уже достигла 250 т, технически возможно создание и более мощных агрегатов. Фактически такая печь может служить миксером для смешения металла, выплавленного в различных агрегатах. При ее герметизации процесс доводки металла можно растянуть на 1–2 ч, что позволяет использовать менее мощные откачные станции, более дешевые (бедные) ферросплавы, а также сооружать передвижные печи — миксеры с

электроподогревом металла. Первые попытки создания подобных печей известны. Если это направление будет развиваться, а основание для такого заключения имеется, то будет решена одна из извечных проблем металлургии — сохранение постоянства температуры в процессе разливки стали, что непосредственно влияет на качество металла.

**Продувка металла газами.** Эффективный прием улучшения качества металла весьма перспективен. Появился даже новый термин — «газовая металлургия» по аналогии с вакуумной металлургией.

Продувка газами стала возможной после освоения производства пористых огнеупоров с размером пор 30—40 мкм, что не позволяет расплаву проникать в них. При продувке металл интенсивно перемешивается, происходит флотация неметаллических включений и дегазация. Наиболее распространена продувка стали инертными газами, особенно аргоном. Конечный результат продувки с точки зрения влияния на качество металла существенно меньший, чем при вакуумировании, но зато ее аппаратурное оформление более просто и меньше стоит. Стремление снизить текущие затраты привело к использованию азота в качестве продувочного газа. Возник определенный парадокс: металлурги в общем случае стремятся предельно уменьшить содержание азота в металле, так как его наличие способствует старению. По этой причине теория предостерегала от контакта расплава с азотом. Однако практика доказала, что положительные факторы (усреднение состава и температуры, удаление неметаллических включений) в сумме не только компенсируют ухудшение качества при поглощении азота расплавом, но и делают его использование эффективным.

Один из весьма перспективных приемов газовой металлургии — аргоно-кислородное обезуглероживание (процесс АОД). Цель — получение нержавеющей стали. Доля нержавеющей стали в общей выплавке стали непрерывно растет, она в 1974 г. составляла в США 1,50%, в Японии — 1,7, во Франции — 2,10, в Швеции — 8,90%. В перспективе ожидается резкое увеличение производства нержавеющей стали (темпы роста производства до 1980 г. 8—10% в год). Это связано с ужесточением требований по охране окружающей среды и с развитием химии и бытовой техники. В ряде стран на-

мечается в ближайшее время на 90% сократить количество вредных газов, выделяемых автомобилями. Это потребует установки каталитических конвертеров или термических реакторов и увеличит расход нержавеющей стали до 30—32 кг на одну машину. Ожидается, что только автомобильная промышленность США будет потреблять свыше 0,36 млн. т нержавеющей металла.

В этой ситуации особое значение имеет разработка экономных и высокопроизводительных способов выплавки нержавеющей стали. Продувку хромистого расплава проводят в специальных ковшах или конвертерах, изменяя состав газовой смеси по заданной программе. Процесс отличается высокими технико-экономическими показателями и бурно совершенствуется. Сейчас в мире находится в эксплуатации свыше 50 установок АОД, а общая их годовая производительность оценивается величиной 5,2 млн. т.

**Обработка металла синтетическим шлаком**, как уже отмечалось, была предложена А. С. Точинским еще в 20-х годах, но широкое применение получила лишь сравнительно недавно. За разработку промышленной технологии обработки стали шлаком большая группа ученых во главе с доктором технических наук С. Г. Воиновым удостоена Ленинской премии.

Процесс исключительно прост и заключается в сливе металла в ковш, содержащий предварительно расплавленный шлак. Струя сливаемого металла обладает столь значительной кинетической энергией, что при попадании в шлак вызывает его эмульгирование и увеличение реакционной поверхности. Поэтому процесс рафинирования протекает очень быстро.

Безусловно, обработка металла шлаком — перспективный способ десульфурации, не только сохранит свое значение в перспективе, но будет совершенствоваться, ибо ныне получены убедительные данные, свидетельствующие об исключительно резком влиянии содержания серы на ударную вязкость металла (что особенно важно для стали, идущей на изготовление газопроводных труб большого диаметра, предназначенных для работы в условиях Крайнего Севера).

Широкое распространение этого прогрессивного и перспективного способа, пригодного для улучшения качества стали в больших масштабах, лимитируется дефицитом глиноземистого сырья для производства шлаков,

а также довольно высокими удельными расходами. Но при системном подходе с учетом преимуществ, получаемых потребителем от снижения брака, общая эффективность технологии весьма удовлетворительна.

**Комбинирование процессов внепечной обработки.** Совершенно очевидно, что совмещение нескольких операций в одном агрегате может дать существенные технологические и эксплуатационные преимущества. Украинский НИИ спецсталей, сплавов и ферросплавов совместно с заводами «Днепроспецсталь» и ПО «Ждановтяжмаш» разработал способ и установку для вакуумирования стали с одновременной обработкой ее в столбе синтетического шлака. Способ запатентован в Японии, ФРГ и других странах. Установка представляет собой вакуумную камеру, сочлененную с трубой, заполненной жидким шлаком. При давлении в камере 1,0—5,0 мм рт. ст. шлак может быть поднят на высоту до 3,0—3,5 м. Общая масса шлака около 5% от всей массы обрабатываемого металла. При попадании в вакуумную камеру металл диспергируется и в виде капель диаметром 3—5 мм проходит через весь столб шлака и собирается в приемном ковше.

При обработке подшипниковой стали содержание кислорода снижается в 2 раза (до 0,002%), серы — до 0,003%, водорода — в 1,5—2 раза. Количество неметаллических включений уменьшается в 2—5 раз, долговечность подшипников возрастает в 2—3 раза. Экономический эффект от внедрения установки (только на одном заводе) — 1,9 млн. руб. в год. В результате повышения долговечности подшипников получена экономия порядка 100 руб. на тонну стали.

Можно привести еще ряд примеров комбинирования отдельных приемов внепечной обработки, но за отсутствием места упомянем лишь об одном. Речь идет о баллистических способах ввода добавок в расплав. Введение алюминия и других легкоокисляющихся элементов в сталь — операция, требующая не только затраты ручного труда в тяжелых условиях, но и технологически несовершенная процедура, приводящая к потере ценных компонентов, к неравномерности распределения, разбросу свойств. От этих недостатков в значительной мере свободен баллистический способ. С помощью пневматического или электромагнитного устройства в расплав с большой скоростью (200—300 м/с) вводят добавки в

виде отдельных порций. В этом случае алюминий, например, несмотря на значительно меньшую плотность, мгновенно проходит слой шлака и внедряется в расплав на глубину порядка 1 м, где и взаимодействует со сталью. Способ позволяет сократить потери ценных компонентов за счет окисления в шлаке, равномерно распределить добавки в объеме металла, а кроме того, появляется возможность вводить материалы с высокой упругостью пара, например магний, который обычным путем ввести в сталь практически невозможно из-за бурного протекания реакции.

Баллистический способ ввода легирующих и модификаторов открывает возможность получения новых композиций и, безусловно, найдет в перспективе широкое применение в металлургии качественных сталей.

**Спецметаллургия.** Под спецметаллургией ныне понимают различные способы переплава с целью глубокого рафинирования металла и улучшения его свойств. Широкую промышленную практику получили электрошлаковый переплав (ЭШП), вакуумный дуговой переплав (ВДП), вакуумный индукционный переплав (ВИП), плазменно-дуговой переплав (ПДП), электронно-лучевой переплав (ЭЛП). Общее производство стали и сплавов методами спецметаллургии сравнительно невелико, однако значимость этого направления развития металлургии трудно переоценить. обстоятельный обзор состояния процессов спецметаллургии дан международным симпозиумом, проводившимся в Киеве. Имеется обширная литература по проблеме, поэтому здесь в силу ограниченности объема брошюры мы укажем лишь на наиболее важные и новые тенденции, которые сохраняются, вероятно, и в перспективе.

**Электрошлаковый переплав.** Преимущества процесса ЭШП, разработанного в СССР под руководством академика Б. Е. Патона и запатентованного во всех развитых странах, способствовали широкому его распространению. Ожидают, что после 1980 г. именно этим способом будут получать в мире вдвое больше жаропрочных сплавов, чем вакуумно-дуговым переплавом.

Важнейшее преимущество ЭШП — возможность получения крупных слитков, в том числе и полых. Особо крупные слитки необходимы для изготовления валков широкополосных станов, валов и роторов турбоагрега-

тов. Масса, например, опорного вала толстолистного стана достигает 260 т. Способ успешно развивается в трех направлениях: улучшение качества, физических и технологических свойств стали; укрупнение установок; расширение номенклатуры изделий и областей применения. Ряд исследователей полагает, что будущее первого направления связано с переплавом незачищенных электродов с раскислением шлака в ходе процесса, смесной шлака и обработкой его нейтральными газами, рафинированием исходного металла, механическим и электромагнитным воздействием на процесс образования капель и кристаллизацию слитка, использованием редкоземельных (РЗМ) элементов. Последнее особенно интересно, поскольку значительный эффект достигается уже при добавке всего 0,1—0,2% так называемого мишметалла (смесь РЗМ). Получаемая литая сталь ЭШП, не уступая по качеству (уровню свойств) деформированной, превосходит последнюю по стабильности свойств, что крайне важно для работы ответственных узлов.

В СССР выполнены также оригинальные работы, показавшие возможность электрохимического легирования при ЭШП. Суть в том, что постоянный ток пропускают через шлак, это способствует переходу кальция, магния, кремния и ряда других элементов из шлака в металл, а главное обеспечивает равномерное распределение легирующих и стабильность свойств.

Большие резервы имеет ЭШП и в части совершенствования оборудования. Известно, что выделяемое в процессе ЭШП тепло только частично идет на расплавление металла (30%). Почти половина тепла, выделяемого шлаковой ванной, безвозвратно теряется с водой, циркулирующей в полом кристаллизаторе. Поэтому большой интерес представляют новые технические решения: охлаждение стенок кристаллизатора инертной смесью, псевдоожиженной воздушной или другим газом. Вероятно, в этом случае можно снизить потери тепла на 20—30%. Вторым решением может быть использование невзрывоопасных охладителей вместо воды.

Третий путь — использование так называемого расходного кристаллизатора, когда часть тепла, теряющегося в обычных схемах ЭШП, идет на расплавление стенок этого расходного кристаллизатора. Это позволяет не только сократить расход энергии, но и укруп-

нить слитки, получая слиток, как бы одетый в оболочку из нерасплавившейся части кристаллизатора, а также двуслойные слитки, что экономит, например, нержавеющую сталь. В различных странах на основе советских разработок выполнены проекты и изготовлены крупные установки ЭШП. В ФРГ с 1971 г. работает печь, позволяющая получать слитки диаметром до 2500 мм и массой 160 т (потенциальные возможности установки — 220-тонный слиток).

Следует отметить, что если, например, для поковки ротора турбогенератора взять сталь более высокого качества вместо 400—500-тонного слитка мартеновской стали, требуется 250—300-тонный слиток ЭШП.

Известна и универсальная, многоцелевая электрошлаковая печь, продукция которой — слитки круглого, квадратного и прямоугольного сечения, а также изделия сложной конфигурации, в том числе и полые. Разработаны установки для выплавки листовых и многослойных слитков. Короче, электрошлаковый переплав прочно вошел в металлургическую практику, и объем его производства в перспективе резко возрастет.

Индукционная плавка, особенно в вакуумных печах, обладает рядом достоинств. В частности, твердая шихта расплавляется в этих агрегатах весьма экономно при минимальном загрязнении как металла, так и окружающей среды. За рубежом сооружаются две 60-тонные тигельные печи, работающие от одного энергоагрегата мощностью 19,5 МВт. Производительность печей 36 т/ч.

В настоящее время активно обсуждается вопрос о переплаве металлизированных окатышей в индукционных печах, в которых благодаря движению ванны создаются более благоприятные по сравнению с дуговой печью условия для проплавления и девосстановления окатышей, а производительность печей уже ныне достигает 50—60 т/ч (канальные печи).

У, вероятно, крупнейшей вакуумной индукционной печи емкость 56 т, она используется для выплавки жаропрочных сплавов. Исследования показали, что, несмотря на высокую стоимость шихты и ряд других ограничений, пока нет более надежного первичного процесса плавки, гарантирующего высокое качество металла. В последнее время индукционные печи, особенно вакуумные, используются в основном в многоступенча-

тых процессах, завершающими стадиями которых является ЭШП или какой-либо другой способ переплава.

Следует указать и на два новых типа индукционных печей, имеющих перспективу. Это, во-первых, горизонтальные печи для непрерывной плавки. По сравнению с обычными тигельными у них следующие преимущества: благодаря заполнению металлом всего объема плавления пространства установленная мощность используется полностью, увеличивается срок службы футеровки, меньше капитальные затраты из-за отсутствия механизма поворота и др. Разработана серия горизонтальных индукционных печей емкостью до 95 т (мощность 20 МВт).

Второй перспективный тип индукционных печей — это так называемые индукционные печи с холодным тиглем (ИПХТ) без футеровки. Тиглем служит охлаждаемая емкость из отдельных электрически изолированных друг от друга секций, окруженных индуктором. Из-за секционности тигля, или контейнера, потери энергии на нагрев материала тигля (медь) существенно меньшие, чем если бы тигель был выполнен сплошным. Это позволяет расплавить металл внутри охлаждаемого (холодного) тигля, на стенках которого образуется тонкий слой гарниссажа. Такие печи очень удобны для работы в герметичном корпусе, в вакууме или при повышенном давлении. Индукционная печь с холодным тиглем — идеальный агрегат с точки зрения гигиены плавки. Решается также извечная проблема стойкости футеровки тиглей индукционных печей. Уже созданы мощные печи с большим диаметром тигля, а также печи для получения слитков хрома, ниобия, вольфрама и др.

Слиток может формироваться как внутри тигля, так и вне его. В последнем случае печь снабжается механизмом вытягивания и вторичным охлаждением. Достоинство ИПХТ — принципиальная возможность работы на тиглях сложной формы, например И-образных или радиальных. В последнем случае слиток вытягивается в горизонтальной плоскости, что уменьшает габариты печи. Но применение подобных печей ограничено существенно более высоким расходом энергии, чем у печей обычного типа (в 2—3 раза). Тем не менее ИПХТ имеют хорошую перспективу, ибо одновременно с расширением производства энергии и уменьшением ее стоимости увеличивается ценность ручного труда, необходимого для

изготовления и ремонта футеровки. Кроме того, ИПХТ обеспечивают предельную чистоту переплава.

**Плазменно-дуговой переплав (ПДП).** Сущность процесса в переплаве предварительно выплавленных и обработанных электродов определенного химического состава в металлическом охлаждаемом кристаллизаторе, причем в качестве источника тепла используется дуговой разряд, создаваемый специальным устройством (плазмотроном) и стабилизированный потоком газа. Под стабилизацией столба дуги или разряда обычно понимают процесс, в котором столб дуги устанавливается или локализуется между электродами. Конструкции ПДП весьма разнообразны, они отличаются способом взаимного расположения плазмотронов и электродов, количеством электродов и плазмотронов и т. д.

Недостатком многоплазмотронных печей является ограниченная мощность плазмотронов, так как увеличение мощности при параллельной работе на постоянном токе на общую ванну-анод лимитируется магнитным взаимодействием между дугами. Уже созданы плазменные печи, работающие при давлении 0,2—0,4 мм рт. ст. Диапазон рабочих давлений может быть расширен до пределов 1,0— $10^{-3}$  мм рт. ст. Плотность теплового потока на поверхности анода при использовании таких источников достигает  $10^3$  кВт/см<sup>2</sup>.

Перспективная область применения ПДП — переплав стружки и отходов высокореакционных сплавов титана, хрома и др. Эффект от использования ПДП для переплава отходов — значителен.

Плазменно-дуговой переплав не имеет ограничений по составу переплавляемого металла. Даже после многократных переплавов не наблюдается изменений исходного химического состава.

Основной эффект применения ПДП — увеличение надежности изделий. Например, сталь, идущая на изготовление подшипников, обеспечивает 100%-ную надежность при 10-кратном увеличении долговечности. Качество стали ПДП во многих случаях выше, чем качество стали ЭШП.

Резюмируя, следует подчеркнуть, что ПДП — универсальный способ рафинирования металла, позволяющий вести обработку в широком диапазоне давлений, а также использовать рафинирующие шлаки различного состава вплоть до чистой окиси кальция. Положительно

влияет на качество металла и кристаллизация слитка в условиях интенсивного теплоотвода.

Технико-экономические показатели ПДП зависят от многих факторов, в том числе и от стоимости аргона, которая пока еще высока. Тем не менее можно с уверенностью сказать, что ПДП — весьма перспективный процесс и будет интенсивно развиваться в направлении увеличения мощности установок.

**Вакуумно-дуговой переплав.** Принцип действия вакуумных дуговых печей (ВДП) очень прост. Предварительно выплавленная и соответствующим образом подготовленная заготовка (электрод) расплавляется в вакууме под действием электрической дуги и, стекая каплями в водоохлаждаемый кристаллизатор, формируется в нем в слиток. Таким образом, сама идея способа предопределяет воздействие нескольких мощных факторов, влияющих на качество металла. Такими факторами являются вакуум, высокая температура в зоне дуги и кристаллизация в условиях интенсивного охлаждения. Способ ВДП наиболее широко распространен в США, где работает не менее 170 печей с годовым выпуском более 225,0 тыс. т. Доля ВДП в общем балансе металла, конечно, невелика. Но лишь благодаря этому способу стало возможным увеличить надежность многих тяжело нагруженных узлов, применяемых в самолетостроении, космической технике, атомной энергетике.

Разработаны вакуумно-дуговые печи, выплавливающие слитки массой от 2 до 100 т. А фирма «Геркус» (ФРГ) располагает проектом печи, позволяющей выплавливать 200-тонный слиток.

Передел круглых слитков требует и соответствующего прессового или ковочного оборудования, хотя известны попытки выплавливать слитки квадратного сечения (прокатка круглых слитков в 2,0—2,5 раза снижает производительность станов).

Существенный недостаток ВДП — невысокая производительность и сравнительно низкий коэффициент использования печи. Так, 50-тонный слиток направляется за 38 ч (1,3 т/ч), но после окончания плавки его в течение 5 ч выдерживают в вакууме и извлекают лишь после 35 ч выдержки, что и определяет производительность печи. Но этот недостаток может быть устранен с помощью системы кристаллизаторов и шлюзовых вакуумных камер. В этом случае процессы наплавки и

охлаждения разделяются и коэффициент использования печи возрастает для крупных слитков до 94—98%.

В последнее время распространение получают агрегаты непрерывного плавления, снабженные двумя независимыми плавильными секциями, но с общим вакуумным оборудованием и силовой установкой. Благодаря быстродействующим устройствам переключение с одного станда на другой занимает считанные минуты.

Резервом увеличения производительности ВДП можно считать переменный ток. Его использование в 2,2 раза увеличивает производительность печи. Но печи на трехфазном токе требуют специальных электродов. Они должны иметь форму секторов цилиндра. Существенно усложняется и механизм перемещения электродов. Все это несколько охлаждает энтузиазм сторонников применения переменного тока.

Для наблюдения за процессом плавки широко применяются проекционные системы дистанционного наблюдения. Известны и системы телевизионного (черно-белого) наблюдения. Большое внимание при разработке конструкции печи уделяется взрывоопасности, так как взрыв при водяном охлаждении возможен. Вакуумно-дуговые печи для переплава стали в этом отношении менее опасны, чем печи, переплавляющие титан, который при высокой температуре взаимодействует с водой с выделением водорода.

Известны и попытки заменить медный кристаллизатор стальным. Смысл этого не только в снижении стоимости оборудования, но и в экранизации ванны от внешних магнитных полей, что положительно отражается на качестве металла.

Перспективы развития способа вакуумно-дугового переплава в значительной мере определяются совершенствованием технологии подготовки электродов. Основным методом обработки поверхности электродов пока остается весьма трудоемкая операция — обдирка. Лишь в отдельных случаях можно ограничиться дробеструйной очисткой поверхности. Значительная часть электродов изготавливается прокаткой с последующей сплошной абразивной зачисткой. Поэтому большое значение имеет разработка горизонтальных машин непрерывного литья круглых заготовок. Можно полагать, что в технологии подготовки электродов этот способ станет

основным, что существенно улучшит экономику процесса в целом.

Основными факторами, способствующими улучшению свойств стали в процессе ВДП, являются дегазация, удаление летучих примесей, диссоциация неустойчивых соединений в вакууме, удаление неметаллических включений и направленная кристаллизация. Комплексное их влияние в общем случае приводит к выравниванию свойств в продольном и поперечном направлении, улучшению обрабатываемости, технологических и эксплуатационных качеств. Как пример можно привести результаты, полученные при переплаве широко распространенной конструкционной стали: относительное удлинение возрастает на 10—15% вдоль волокна и на 15—25% в поперечном направлении, порог хладноломкости — соответственно на 12,0—30,0% и 80,0—100% (при сохранении уровня прочностных свойств). Ударная вязкость — в 1,5—2,0 раза (это позволяет вместоковки использовать более экономную технологию обработки).

В последнее время активно обсуждается вопрос о преимуществах отдельных переплавных процессов, особенно ЭШП и ВДП. Первый, как подчеркивалось выше, позволяет осуществлять глубокую десульфурацию, но не обеспечивает удаление водорода в общем случае. Однако применение электродов из металла, подвергнутого внепечному вакуумированию, дает возможность получить сплав с содержанием водорода не более 0,00625% по всей высоте слитка. Оказалось, что электрошлаковым переплавом формируется металл, который можно обжимать с большими усилиями, нежели металл после ВДП и ВМП. После ЭШП удается и прокатать металл на более тонкий лист. Отмечается также и большая однородность металла ЭШП по содержанию примесей, большая чистота по включениям, более высокие и более однородные механические свойства. Особенно большое различие выявляется по включениям.

По этим причинам некоторые специалисты считают, что после 1980 г. доля электрошлакового переплава будет возрастать, а доля ВДП снижаться. Может быть и так, но это не значит, что вакуумно-дуговой переплав не имеет перспектив. Новые возможности открываются при использовании флюсов, способствующих формированию хорошей поверхности слитков, такой, что она не нуждается в зачистке перед деформацией, образованию

плотной литой макроструктуры металла без каких-либо дефектов, снижению (вдвое) содержания серы.

Однако оценка по одному или даже по нескольким параметрам не всегда дает однозначную информацию относительно эксплуатационных характеристик материала. Более показательны интегральные свойства, например, так называемый коэффициент  $B_{10}$  или  $B_{50}$  для подшипниковой стали — время до выхода из строя 10 или 50% подшипников испытываемой партии. Сравнение показывает существенные преимущества ВДП по сравнению с открытой плавкой.

Таким образом, практика свидетельствует о благоприятном влиянии ВДП на механические свойства и надежность переплавляемых сплавов ответственного назначения, а также о больших возможностях совершенствования как технологии, так и конструкции установок. В конечном счете все это определяет целесообразность применения ВДП в промышленности и будет способствовать сохранению его роли в перспективе.

**Электронно-лучевой переплав.** Из всех способов специаллургии он наиболее дорогой и наименее производительный. Производительность печей ЭЛП вдвое ниже, чем ЭШП в сопоставимых условиях, величина текущих расходов в 2,5 раза выше, расчетные полные капитальные затраты на 1 т чистовых слитков в 2,7 раза выше. Если сравнивать различные способы специаллургии по отношению к затратам на открытую плавку, то ЭШП характеризуется увеличением затрат в 1,75 раза, ПДП — в 2,03 раза, ВДП — в 2,4 раза, а ЭЛП — в 2,72 раза.

Значительно более высокие расходы на ЭЛП и определяют ее место среди других методов. Способ не получил пока широкого промышленного применения; и хотя число установок ЭЛП уже значительно, масса слитков не велика, а объем производства также невелик.

Тем не менее перспективы развития способа весьма благоприятны. К тому же можно ожидать расширения областей применения основного принципа плавки. Идея способа заключается, как известно, в том, что на пути потока электронов, генерируемых электронной пушкой, помещают переплавляемый материал. Энергия, выделяемая при торможении пучка, используется для расплав-

ления материала, собираемого в охлаждаемом кристаллизаторе. Совершенно очевидно, что реализация способа возможна лишь в глубоком вакууме порядка  $10^{-4}$ — $10^{-5}$  мм рт. ст. В зоне взаимодействия электронного пучка с материалом возникает область высокого перегрева. Сочетание глубокого вакуума, высокой температуры и кристаллизация в условиях интенсивного охлаждения определяют особенности процесса рафинирования в печах ЭЛП.

Следует отметить, что эти особенности полностью не изучены и не вскрыты. Например, весьма интересный эффект обнаружен при нагреве поверхности листа или ленты. В результате этого своеобразного отжига резко улучшаются свойства материала, особенно сплавов электротехнического назначения. Можно полагать, что электронный пучок не только нагревает поверхность, а вызывает и более глубокие изменения в тонкой структуре границ зерен неметаллических включений. Правда, это только предположения, нуждающиеся в экспериментальной проверке.

Из изложенного видно, что современная металлургия качественных сталей практически использует все известные способы нагрева. Для полноты картины следует упомянуть и **радиационный нагрев**. В Испании работает предприятие, осуществляющее выплавку и рафинирование тугоплавких металлов в солнечной печи, выполненной в виде параболлоида, составленного из отдельных зеркал, общая площадь которых, вероятно, около 1000 м<sup>2</sup>. Радиационный нагрев, по сути своей, имеет много преимуществ, так как это действительно бесконтактный способ нагрева, позволяющий осуществлять переплав любых материалов (температура в фокусе около 4000°C) в любой атмосфере, в широком диапазоне давлений — от глубокого вакуума до сверхвысоких давлений. Увеличение мощности подобных печей ограничено существующими источниками излучения (исключая, конечно, солнце), тем не менее известны предложения использовать радиацию, например, для подогрева прибыли слитка и ряд других.

Часто задаются вопросом о возможности создания **лазерных печей**. Такая возможность, конечно, не исключается. Более того, технически это возможно и сегодня. Но, по нашему мнению, значительно больше привлекательных черт у лазерного облучения поверхности,

Цель — улучшить ряд эксплуатационных характеристик материалов. Особого внимания заслуживают сообщения о возможности создания на поверхности металла лазерным облучением слоя с высоким сопротивлением коррозии и износу. Если сообщения подтвердятся и будет придумана технология обработки массовых изделий, это позволит существенно сократить расход дефицитных материалов.

**Разливка стали.** Этот этап технологии стал в последние годы объектом интенсивных исследований, так как именно разливка на большинстве предприятий отрицательно отражается на увеличении эффективности производства. Здесь следует отметить переход к использованию скользящих (шиберных) затворов, преимущественное использование непрерывной разливки, разливки под регулируемым давлением и ряда других приемов, направленных на интенсификацию производства, улучшение качества металла, условий труда. Последнее особенно важно, так как условия труда при разливке очень тяжелы. Применение скользящих, или вращающихся, затворов, конечно, коренным образом изменяет условия труда, позволяет регулировать скорость разливки, что непосредственно отражается на качестве металла. Скользящие затворы успешно внедряются в СССР и в ближайшее время вытеснят традиционные устройства.

Еще несколько лет тому назад весьма заманчивым и вероятным казалось использование электромагнитных устройств для регулирования скорости разливки путем электромагнитного пережима струи, а также «магнитной летки», т. е. запорного устройства, позволяющего исключить тяжелый труд по обслуживанию выпускного отверстия. Однако более простые и надежные скользящие затворы оттеснили подобные устройства.

Конечно, наиболее значительным событием в этой области следует считать широкое распространение непрерывной разливки. На основе этого метода в СССР построен впервые в мировой практике крупный металлургический завод (Ново-Липецкий), где вся сталь разливается на машинах непрерывного литья заготовки (МНЛЗ). Начиная с 60-х годов высокоэффективный процесс непрерывной разливки стал интенсивно развиваться и за рубежом. Если в 1969 г. в Японии доля непрерывной разливки в общей выплавке стали составляла 4,1%, то ныне там разливают таким образом не менее

40% стали. Доказано, что непрерывная разливка экономит до 15% металла благодаря его более высокому качеству и отсутствию потерь. Ожидают, что не менее  $\frac{1}{3}$  всего выплаваемого в мире металла уже к 1985—1990 гг. будет разливаться на МНЛЗ.

Наиболее быстро совершенствуются машины для отливки листовой заготовки (слябы). Их производительность приближается к 1,0 млн. т в год и, вероятно, скоро превысит этот рубеж за счет увеличения скорости вытягивания слябов до 3—5 м/мин (сейчас проектная скорость 1,0—2,5 м/мин). Значительно сложнее (по принципиальным соображениям) создать высокопроизводительные машины для отливки сортовой заготовки, так как в данном случае существенно меньше поверхность охлаждения.

Наиболее распространенными МНЛЗ стали в последние годы машины, в которых заготовка с помощью специальных устройств переводится (по радиусу или по иной кривой) из вертикальной плоскости в горизонтальную. Такое решение позволяет существенно сократить вертикальные габариты установок. Однако металлоемкость машин еще весьма значительна — около 5000 т.

В настоящее время на МНЛЗ изготавливают заготовки широкого марочного сортамента и большого количества профилеразмеров: круг диаметром от 100 до 500 мм, квадрат со стороной 50—350 мм и более, слябы толщиной от 70 до 350 мм и шириной до 2500 мм. Некоторые конструкции допускают отливку слябов шириной до 3200 мм. Производительность МНЛЗ определяется скоростью разливки, которая ограничена условиями теплопередачи от расплава к охлаждающей среде. Увеличение скорости разливки — одна из важнейших проблем.

Помимо специальных приемов подготовки расплава, улучшающих качество стали путем ее дегазации, рафинирования, десульфурации, модифицирования и микролегирования, ученые стремятся совершенствовать конструкцию узлов МНЛЗ. Один из возможных вариантов — увеличение сечения отливки благодаря использованию прямоугольной заготовки. Скорость вытягивания таких заготовок определяется размером ее узкой стороны, а производительность при заданной скорости раз-

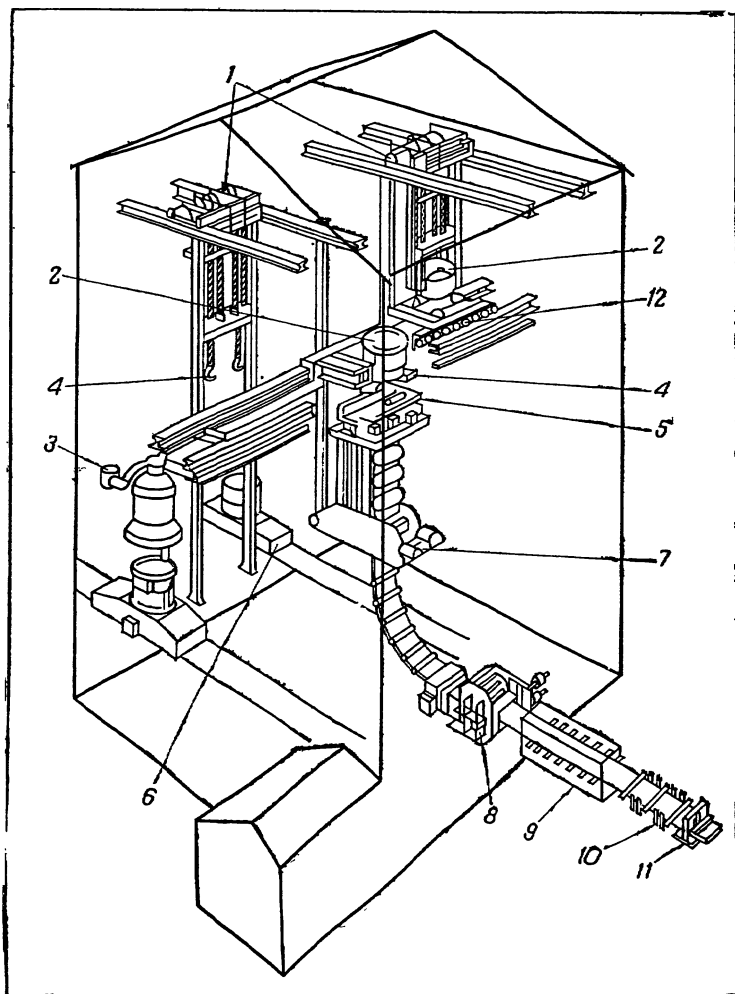
ливки находится в прямой зависимости от размеров широкой стороны прямоугольника.

Весьма привлекательно совместить машины непрерывной разливки с прокатным станом. В СССР под руководством академика А. И. Целикова еще в начале 60-х годов был создан первый литейно-прокатный агрегат, который и поныне успешно работает на одном из заводов. Основная трудность при создании этого агрегата — различие скоростей выхода металла из кристаллизатора (1,2—3,5 м/мин) и входа его в прокатную клетку, которая на обычных прокатных станах может составлять 30—60 м/мин. Тем не менее совмещение процессов разливки и деформации имеет так много явных преимуществ, что полностью компенсирует некоторую потерю производительности стана.

Совмещенный агрегат, который успешно работает в СССР, снабжен в качестве обжимного устройства планетарным станом принципиально нового типа, в котором обжатие осуществляется с четырех сторон. Вытяжка за один проход достигает на таком стане 80! (В обычном случае, чтобы получить такую вытяжку, используют 8—12 клетей). Это позволяет подавать в стан заготовку со скоростью всего 1,0—6,0 м/мин, что совпадает со скоростью вытягивания МНЛЗ. Скорость же выхода проката из планетарного стана может достигать 300 м/мин. Значительная величина обжигания на совмещенном агрегате благоприятно отражается на качестве металла.

На одном из заводов США эксплуатируется промышленная установка, в которой сляб, вытягиваемый из МНЛЗ, проходит плавильную машину, проходную нагревательную печь и попадает в непрерывную группу из семи прокатных клетей, снабженных чередующимися горизонтальными и вертикальными клетями. На этой машине еще в 1972 г. отлили без остановок в течение 83 ч 107 плавок общей массой 2000 т, причем за это время 27 раз меняли сечение готового сляба (рис. 4).

Конечно, совмещение непрерывной разливки с прокаткой увеличивает производительность интегрированного агрегата по сравнению с обычной схемой, особенно при установке прокатных станов, обеспечивающих максимальное обжатие. В этом случае, как показывают эксперименты, даже при скорости вытягивания заготовки



**Рис. 4. Схема совмещенной установки**

1 — подъемник сталеразливочного ковша; 2 — сталеразливочный ковш; 3 — одна из двух установок вакуумирования; 4 — промежуточный ковш на тележке; 5 — кристаллизатор; 6 — тележка для транспортирования сталеразливочного ковша; 7 — тянущие валки; 8 — правильная машина; 9 — подогревательная печь; 10 — обжимной стан; 11 — газорезка; 12 — разливочная тележка

порядка 1,2 м/мин скорость изделия на выходе 21,4 м/мин.

В настоящее время за рубежом работает не менее 12 МНЛЗ, совмещенных с прокатными станами различных типов. Годовая производительность агрегатов от 25,0 тыс. т до 3,0 млн. т в год. Основной вид продукции — лист и в меньшей мере — сорт.

Создание литейно-прокатных агрегатов большой производительности имеет принципиальное значение как важный шаг на пути реализации непрерывного процесса производства стали, что радикально изменит технико-экономические показатели черной металлургии. Эта задача должна привлечь внимание исследователей и изобретателей обилием нерешенных «подзадач». Одна из них — влияние жидкой фазы на процесс деформации. Весьма заманчиво начинать деформацию на ранних стадиях, когда сердцевина слитка еще находится в жидком состоянии. Но пластические свойства металла в твердожидком состоянии очень низки, поэтому часто в заготовке образуются трещины и другие дефекты. Тем не менее в ФРГ и в Австрии работают агрегаты, деформирующие заготовку с жидкой сердцевиной. Однако получить удовлетворительные результаты можно только при строжайшем контроле технологии. Вероятно, одним из путей подхода к решению проблемы является использование закономерностей физико-химической механики, разработанной школой крупнейшего советского ученого академика П. А. Ребиндера. Именно П. А. Ребиндер впервые обосновал фундаментальное положение о том, что деформация является не только механическим, но и физико-химическим процессом, приводящим к образованию новых поверхностей. Изучение процесса деформации непрерывно-литой заготовки с позиции физико-химической механики — плодотворная задача дальнейших исследований.

Возможности способа непрерывной разливки, который впервые получил промышленное применение в СССР, далеко не исчерпаны. Работы школы академика А. И. Целикова в области создания литейно-прокатных агрегатов непрерывного действия, несомненно, будут продолжены.

Ежегодно мы знакомимся с большим количеством новых технических предложений как в области конструкций машин, так и в области технологии, часть из

которых, несомненно, имеет отличные перспективы. Одним из них является идея об использовании так называемых микрохолодильников. Его реализацией успешно занимается школа академика АН УССР В. А. Ефимова. Суть здесь заключается в том, что в кристаллизатор МНЛЗ вводится определенное количество металлической дроби диаметром 1,0—1,5 мм. Процесс расплавления и растворения в расплаве дроби отбирает часть тепла, которое нужно отвести от заготовки, что позволяет на 20—30% увеличить скорость вытягивания, а главное улучшить качество слитка (увеличить плотность) в центральной части, которая особенно часто бывает поражена дефектами. Интересно, что подобный же прием — введение дроби в расплав — использовал еще в XIX в. П. П. Амосов при разработке технологии изготовления знаменитой булатной стали.

Для равномерного и порционного введения дроби в расплав используют различные приемы. Ибо оказалось, что равномерно распределить дробь в 1,0—2,0% от массы стали в расплаве — далеко не простая задача. Удачным решением является применение так называемой «электромагнитной пушки». Пушка эта за счет энергии импульса выбрасывает из соленоида порцию дроби. Частота «выстрелов» может быть значительной, что определяет высокую производительность устройства.

К тому же и конструктивно «пушка» хорошо вписывается МНЛЗ, так как можно разместить несколько устройств, подающих по направляющим, изогнутым в требуемом направлении трубкам, порции дроби. Устройство позволяет вводить дробь различного состава, в том числе легирующие ферросплавы, что расширяет возможности технологии.

Уже длительное время ведутся работы по созданию МНЛЗ горизонтального типа. Выгоды такого решения очевидны. Правда, на пути промышленного внедрения подобных машин существуют определенные трудности. В принципе они преодолимы, и горизонтальные машины сыграют свою роль, особенно в маломасштабном производстве качественных сталей.

По нашему мнению, перспективным направлением является и так называемая разливка под регулируемым давлением и графитовые формы-изложницы. Сейчас в мире эксплуатируется 12—15 установок такого типа с годовой производительностью 0,2—0,4 млн. т каждая.

Принцип действия установок таков. Металл под давлением воздуха (2—4 ат), магнетомого в герметичную камеру, поднимается по вертикальному металлопроводу и заполняет графитовую разъемную форму. Таким способом уже отливают слябы массой до 32 т, но это не предел. Стойкость графитовых форм достигает 5000 наливов вместо 80—100 для чугунных изложниц. Причем металл практически любого состава может заливаться в однотипные формы, тогда как ныне приходится иметь в каждом цехе изложницы 10—15 типоразмеров.

Разливка под давлением имеет важнейшее принципиальное отличие от обычной: речь идет о том, что пристенная корочка затвердевшего металла плотно прижимается к холодным стенкам изложницы. Это в 5—7 раз увеличивает скорость кристаллизации (ибо уменьшается тепловое сопротивление воздушного промежутка, возникающего из-за усадки), что позволяет увеличить скорость заполнения формы до 15—25 т/мин, улучшить качество металла благодаря его большей плотности и уменьшению неоднородности. К достоинствам метода следует отнести и высокую чистоту поверхности, настолько высокую, что отпадает необходимость в трудоемких операциях зачистки (ремонта) заготовки.

Совершенствование этого весьма прогрессивного способа тормозится рядом чисто технических и организационных трудностей. Однако его преимущества столь очевидны, что перспектива не вызывает сомнений. Достаточно указать на любопытный факт: требуемый весьма высокий уровень свойств металла опор трубопровода на Аляске удалось получить только при использовании разливки под регулируемым давлением.

Объем брошюры не позволяет подробно рассмотреть влияние давления на изменение кинетики кристаллизации, строение, состав, количество неметаллических включений, газов и другие свойства, определяющие качество металла. Поэтому ограничимся лишь указанием на то, что именно давление, согласно современным взглядам на строение расплавов, развитым школой академика А. М. Самарина, является наиболее результативным фактором воздействия на качество. Вопрос заключается лишь в разработке оптимальных и технологичных инженерных решений. Одно из таких решений — разливка под регулируемым давлением. Другое возможное решение, масштабы применения которого пока ограни-

чены, но в недалеком будущем они, безусловно, возрастут,— кристаллизация под поршневым давлением.

Доказано, что уже при давлении около  $1000 \text{ кг/см}^2$  в металле полностью исчезают литейные пороки, нет усадочной раковины, свойства в продольном и поперечном направлении сближаются, резко возрастает сопротивление удару. Способ этот не нов, он использовался еще в начале века на отечественных заводах, но не прижился главным образом из-за организационных трудностей, высокой стоимости мощных прессов, отсутствия высокопрочных материалов для прессового инструмента.

Ныне положение изменилось. В СССР созданы уникальные прессы (один из которых усилием 67 000 т установлен во Франции и признан «машиной века»). Особенность новых отечественных прессов, разработанных в СССР, не только в величине усилия, но и в снижении металлоемкости в 5—7 раз по сравнению с предшествующими поколениями машин. Все это благоприятствует совершенствованию способа в основном в металлургии высоколегированных сплавов и сталей, которые обычно отливаются в небольшие по массе слитки (до 1,0 т) и обработка которых по традиционной технологии связана с большой обрезью головной части (20—30%) для устранения литейных дефектов.

В заключение необходимо еще раз подчеркнуть, что состояние завершающих этапов технологии выплавки качественных сталей (внепечная обработка и разливка) тормозит ее совершенствование и именно здесь, именно в этой области остро ощущается необходимость в новых, нетривиальных решениях.

## **«Большая» порошковая металлургия**

Один из наиболее рациональных путей экономии металла — безусловно, порошковая металлургия. Она являет нам классический пример наиболее перспективной малооперационной технологии.

Советский специалист В. С. Раковский определяет порошковую металлургию как «особую отрасль техники, сущность которой заключается в изготовлении различными методами порошков металлов, их сплавов,

различных полуфабрикатов и готовых изделий из них путем компактирования».

Статистические данные показывают, что перевод 1 т деталей на изготовление методом компактирования порошка экономит в машиностроении 2,5 т проката, а с учетом металлургического передела — 2,9 т стали, причем на изготовление 1 т изделий расходуется 0,8—0,9 т порошка. Если учесть, что среднее содержание железа в сырых рудах СССР составляет в настоящее время 36,5%, то получается, что 1 т железного порошка экономит до 2,2 т руды и 0,33 т коксующегося угля. Наряду с экономией металла производство спеченных деталей (согласно ГОСТу изделия, изготавливаемые методом порошковой металлургии, названы «спеченными») дает значительный экономический эффект. При этом высвобождаются и трудовые ресурсы, и металлообрабатывающие станки.

Приведенные данные не учитывают тот важнейший факт, что спеченные материалы обеспечивают и больший срок службы, чем детали из проката или литья. Например, стойкость спеченных деталей гидроаппаратуры в 2,0—2,5 раза выше, чем тех же деталей, изготовленных из обычной стали. Стойкость инструмента из порошковой быстрорежущей стали в 5—6 раз выше, а стойкость спеченных валков прокатных станов возрастает в 30—50 раз. Число подобных примеров можно умножить.

Напомним, что стоимость механической обработки составляет в СССР свыше 16,0 млрд. руб. в год. При этом образуется 7,0 млн. т стружки и 8,0 млн. т отходов, сбор и утилизация которых представляют собой серьезную проблему. В одной из западных стран ежегодно уже используется около 100,0 тыс. т спеченных изделий, что позволило сэкономить за 5 лет более 2,0 млн. т черных металлов. Если учесть, что в ней 50—60% спеченных материалов потребляется автомобильной промышленностью, то к экономии металла следует добавить еще и экономию топлива, ремонтных работ и пр., что в несколько раз увеличивает эффект их применения.

Преимущества порошковой металлургии давно доказаны жизнью. Однако объем производства остается несопоставимым с объемом производства проката, хотя темп роста мощностей порошковой металлургии непрерывно увеличивается (15—20% в год).

В чем причина недостаточно динамичного развития порошковой металлургии при наличии столь важных принципиальных преимуществ технологии? Это тем более удивительно, что метод известен очень давно и, безусловно, старше современных способов изготовления массового металла. Еще в Киевской Руси применяли, как показывают археологические находки, порошки и изделия из них.

Научные основы современной технологии были заложены нашим соотечественником П. Г. Соболевским, который в 1827 г. предложил и обосновал способ «изготовления компактных изделий из порошков путем холодного прессования с последующим спеканием заготовки при температуре, составляющей  $\frac{2}{3}$  от температуры плавления».

В настоящее время порошковая металлургия переживает, по нашему мнению, второе рождение. Появилась четкая тенденция к увеличению масштабов производства, наметился выход в «большую» металлургию. Помимо изготовления спеченных изделий в машиностроении, значительный эффект может быть получен и при замене литого слитка спеченным из порошка. Дело в том, что одной из основных причин снижения качества стали является неоднородность строения слитка. Хорошо известно, что в общем случае неоднородность увеличивается с ростом массы слитка. С другой стороны, интенсификация производства требует увеличения массы слитка при одновременном улучшении его качества. На одном из японских заводов уже катают слитки массой 47 т, однако получить здоровый слиток такой массы — чрезвычайно трудная задача. Вот почему особое значение имеет развиваемая в последние годы членом-корреспондентом АН СССР А. И. Манохиным концепция однородной стали. Один из элементов ее получения — капельная кристаллизация, т. е. быстрое охлаждение мелких частичек металла, образующихся при разрушении струи, например, при воздействии на нее газа или воды под высоким давлением. Такой технологический прием часто называют «распылением».

Из многочисленных способов получения порошков — восстановление окалины рудных концентратов, механическое измельчение, распыление и др. — для «большой металлургии», по-видимому, наиболее приемлемо распыление расплава. Преимущества этого способа в срав-

нительной простоте, компактности, высокой производительности оборудования, однородности состава порошков, возможности регулирования их крупности, формы и пр. Рассмотрим в качестве примера использования приемов порошковой металлургии для получения слитков процесс получения быстрорежущей стали, который уже широко используется.

Абсолютный объем производства быстрорежущих сталей невелик. Однако влияние качества этой марки стали на производительность труда при механической обработке исключительное, поэтому состав стали непрерывно совершенствуется. Одно из серьезных достижений — создание так называемых сверхвысокоуглеродистых сталей, содержащих не 0,8% углерода, как обычно, а 1,4—1,5%. Но трудности выплавки и обработки резко возрастают по мере увеличения содержания углерода и легирующих. Особенно неприятно неоднородное распределение карбидных включений. Причем опасность карбидной неоднородности возрастает по мере увеличения содержания углерода.

Выход был найден в принципиально новом решении, согласно которому выплавленную в электропечи сталь требуемого состава распыляют, воздействуя на расплав струями сжатого аргона или азота. Эта операция производится в колонне высотой порядка 12 м. Такая высота нужна для того, чтобы обеспечить требуемую скорость охлаждения капель металла. Полученный порошок затем классифицируют, загружают в контейнер с герметичной крышкой и изостатически (всесторонне) компактируют в сосудах высокого давления — гидростатах. Для образования материала с плотностью 60—70% от теоретической достаточно давление порядка 1000—2000 ат. Гидростаты сегодня столь велики, что позволяют компактировать порошок в заготовку массой 7—10 т, причем весь цикл занимает около 20—30 мин.

Полученный в гидростате «псевдослиток» отличается высокая однородность свойств во всех сечениях. Можно сказать, что такой слиток идеален, его качество не зависит от массы. Химический же состав литого слитка по таким элементам, как углерод, сера, фосфор и др., может многократно отличаться в отдельных сечениях.

К химической неоднородности добавляется и физическая, т. е. газовые пустоты, скопления неметаллических включений. Причем чем дольше металл сохраняет

ся в жидком состоянии, тем вероятнее возникновение неоднородности. Ясно, что крупные слитки, в которых металл сохраняется в жидком или в твердо-жидком состоянии длительное время (иногда сотни часов), наиболее склонны к проявлению неоднородности. Ускорить охлаждение во многих случаях невозможно, так как увеличивается опасность появления трещин. Поэтому практика давно уже выработала надежный, но весьма дорогой прием: слитки безжалостно обрезаются. Из слитка и из заготовки после первичной деформации удаляются наиболее загрязненные части: головная и донная. В целом из-за несовершенства слитка выход годного иногда сокращается на 20—30%, а часто и еще более того. От этого порока полностью свободен способ получения однородного порошкового слитка. Следующей технологической операцией является дегазация и нагрев «псевдослитка» до 700—900°С, что ускоряет заключительный этап — спекание под давлением газа (аргона) 1000—1600 ат и при температуре 1000—1100°С в газостатах. Установлено, что с увеличением давления снижается минимальная температура, при которой протекают процессы спекания, что позволяет ограничить неизбежный рост зерна при нагреве.

Результатом спекания является материал с предельно высокой плотностью, идеально однородный по всем сечениям, с минимальным размером зерен и с минимальным количеством всех видов неоднородностей. Многие извечные проблемы металлургии просто полностью отпадают при таком способе производства. Так, размер неметаллических включений при быстром охлаждении уменьшается до значений, когда их опасностью как концентраторов напряжений можно пренебречь. При давлении 1600 ат растворимость газов возрастает, согласно закону квадратного корня, в 40 раз, поэтому не могут образоваться даже мельчайшие поры, что, в свою очередь, обеспечивает при шлифовке получение поверхности высшего класса чистоты.

Стоимость продукции, получаемой описанным способом, выше, чем изготовленной по традиционной технологии. Но сокращаются расходы на шлифовку (30% от расходов на передел), а стойкость инструмента возрастает в 5—7 раз. Например, при сверлении в отливках из серого чугуна глухих отверстий диаметром 50 мм обычно сверла заменяются после 500—600 операций; при

использовании порошковой быстрорежущей стали ресурс сверла 3500 операции до переточки и еще 3000 после переточки. И подобных примеров множество.

Выгоды процесса при системном подходе с учетом экономики смежных отраслей совершенно очевидны. Возможности новой технологии не ограничиваются, конечно, только производством быстрорежущей стали. В принципе таким образом могут быть получены изделия из любых сталей и сплавов, в том числе и многослойные композитные материалы.

В Англии работает установка по производству турбинных дисков из жаропрочных сплавов. Полагают, что использование порошковых методов позволит создать и новое поколение реактивных двигателей. Дальнейшим развитием технологии является использование стеклянных форм вместо металлического контейнера из мягкой стали. Засыпая тонкий порошок в форму из тугоплавкого стекла или из кварца, можно получить деталь самой сложной конфигурации. В процессе нагрева стекло размягчается и становится эластичным, что гарантирует передачу рельефа деталям; после охлаждения стеклянную форму разбивают и переплавляют.

Спекание порошка в одноразовых формах в известном смысле можно рассматривать как процесс «порошкового литья». Но, конечно, спекание обладает многими преимуществами по сравнению с литьем. Отсутствует расход металла на литники и прибыли, нет взаимодействия расплава с формой, структура «отливки» во всех сечениях идентична, содержание газов и включений много меньше, чем в литых заготовках. Спекание в эластичной форме под давлением позволяет не только получить изделие самой сложной конфигурации, но и самого сложного состава. По сути дела, способ не имеет ограничений по составу, что открывает новые технологические возможности. Например, получение изделий из смеси порошков тугоплавких металлов и их соединений со стеклом, пластмассами и др.

Сооружаемые в настоящее время за рубежом цехи по производству порошковой быстрорежущей стали рассчитаны на выпуск всего нескольких тысяч тонн металла в год. Имеется ли возможность увеличить объем производства спеченных слитков и заготовок, а также расширить сортамент? Ведь помимо быстрорежущей стали, жаропрочных сплавов, большой интерес представ-

ляет и производство штампового металла, валков, прецизионных сплавов, бурильного инструмента и металла других назначений. Что лимитирует экстенсивное развитие способа?

Процесс распыления расплава сжатым нейтральным газом имеет большие резервы и не ограничивает рост производства. Мощность установок по получению порошков распылением в последние годы возросла в 17 раз, а объем производства порошков восстановлением железорудных материалов — только в 4 раза. Технологические возможности диспергирования струи расплава разнообразны. В качестве распыляющего газа во многих случаях целесообразно использовать чистый азот, содержащий менее 0,005% кислорода. Это обеспечивает дополнительное газовое легирование и улучшает качество инструментальных сталей. Созданы установки и с регенерацией отработанного газа (аргона). Изменение температуры перегрева расплава позволяет увеличивать выход мелких фракций порошка, что, в свою очередь, ведет к возрастанию доли метастабильных соединений в порошке, а в отдельных случаях — к получению квазиморфных порошков с уникальным комплексом свойств.

Помимо распыления струи сжатым газом, используются и сухие способы диспергирования — дробление струи при ударе быстровращающейся лопасти или центробежное распыление сливом струи на конический диск, вращающийся со скоростью порядка 4000 об/мин, и др. Одна из зарубежных фирм освоила двустадийный процесс, когда на первой стадии металл насыщают водородом, а на второй вакуумируют, что и приводит к получению порошка. Определенные преимущества имеет распыление струи водой под давлением до 180 ат, однако такой способ требует довосстановления порошка в водороде при исходном содержании кислорода ~1,0%.

Наиболее длительная стадия процесса — спекание в газостатах. Газостаты существующих типов ограничивают размер заготовки. Наличие в газостате элементов сопротивления снижает почти вдвое полезный объем сосуда высокого давления. Однако, как показал опыт, применение газостатов не всегда обязательно. Так, одна из английских фирм вместо обработки в газостатах на заключительной стадии процесса применяет экструдирование, т. е. продавливание нагретой заготовки с получе-

нием из последней любых профилей. Способ опробован для быстрорежущей стали, а также для нержавеющей клапанных подшипниковых сталей, сплавов на основе никеля, кобальта и др. Очень важно, что таким образом можно изготавливать биметаллические изделия (сталь — медь, нержавеющая сталь — высокопрочная сталь и т. д.).

Другой вариант конечной обработки порошка — производство горячекатаной ленты. Порошки в этом процессе получают распылением водой под давлением 35 ат в среде инертного газа. После сушки в вакууме порошок компактируют прокаткой, а сырую полосу быстро нагревают в атмосфере диссоциированного аммиака и снова прокатывают до 100% плотности. Так удается получать полосу шириной 305 мм, толщиной 0,68—3,8 мм из широкой гаммы сплавов. Полагают, что можно создать непрерывную линию с годовой производительностью 0,3 млн. т при существенно меньших капитальных вложениях, чем при традиционной технологии, и при высоком качестве материала.

В последнее время предложены и другие перспективные решения по улучшению конструкций газостатов, увеличению их производительности и габаритов получаемых изделий.

Можно с уверенностью сказать, что к концу века порошковая технология займет достойное место в большой металлургии. Это позволит существенно снизить как металлоемкость машиностроения, так и объем производства литой качественной стали.

## Атомная металлургия

Выше мы уже отмечали, что развитие металлургии на перспективу в значительной мере связано с развитием атомной энергетики. Решениями XXV съезда КПСС предусмотрено форсирование развития атомной энергетики. Из общего прироста производства электроэнергии в десятой пятилетке около 20% падает на атомные электростанции (АЭС). В дальнейшем темп развития атомной энергетики будет еще более высоким. Ни одна отрасль техники не знала подобных темпов развития. Достаточно указать, что в 19 странах мира в настоящее время находится в стадии строительства 193 АЭС. Стои-

мость электроэнергии на АЭС непрерывно снижается. Так, проектная себестоимость электроэнергии на Ново-Воронежской АЭС установлена в 0,573 коп/кВт·ч. В перспективе стоимость электроэнергии АЭС достигнет 0,2—0,4 коп/кВт·ч.

Черная металлургия — крупнейший (после энергетики) потребитель топлива, причем наиболее дефицитных видов топлива, и значительной доли производимой электроэнергии.

Учитывая сложившееся и ожидаемое соотношение стоимости на отдельные виды топлива, особое внимание до последнего времени уделялось возможной оптимизации топливного баланса за счет использования атомной энергии, ибо абсолютный расход топлива по мере роста производства возрастает в черной металлургии СССР каждые 5 лет на 20—25%. При этом в первую очередь расходуются наиболее технологичные виды топлива. Так, расход природного газа черной металлургией возрастает за пятилетку в 1,5 раза, темп же роста потребления твердого топлива этой отраслью не превышает 15%, а жидкого — 7,5%. Соответственно изменяется и вес отдельных статей топливного баланса.

Ныне 84% всего чугуна выплавляется с использованием газа, свыше 60% мартеновских печей также сжигают природный газ. Но по мере истощения запасов газа в европейском регионе возрастает его стоимость и увеличивается дефицит. За период 1965—1980 гг. доля газа, добываемого в европейской части СССР, сократилась с 71,5 до 17%, дальность транспортировки выросла с 589 км в 1960 г. до 1384 км в 1975 г., а к 1980 г. достигнет 2600 км. Скважины в 1980 г. станут глубже на 45% по сравнению с 1970 г. По данным доктора технических наук В. А. Смирнова, влияние негативных факторов, увеличивающих стоимость газа у потребителей в европейской части СССР, «в 3—5 раз сильнее влияния факторов технического прогресса», поэтому стоимость газа и в дальнейшем будет возрастать.

Есть основание полагать, что темп увеличения стоимости природного газа будет еще выше, ибо возрастает доля и стоимость металла северного исполнения. Опыт сооружения трубопровода в штате Аляска (1200 км), где более мягкие климатические условия, чем на советском Севере, показал, что следует в этих условиях использовать металл с весьма высоким пределом текуче-

сти порядка 60 кг/мм<sup>2</sup> (при —60°С). Стоимость труб из такого металла существенно выше, чем обычных.

Из изложенного следует, что хотя СССР и обладает огромными промышленными запасами природного газа, высокая стоимость транспортировки его в европейскую часть может отрицательно повлиять на экономику черной металлургии. Следует добавить, что ценность природного газа как химического сырья также резко возрастет к концу века.

В «Основных направлениях развития народного хозяйства СССР на 1976—1980 гг.» своевременно поставлена задача «совершенствовать структуру топливно-энергетического баланса, более рационально и экономично использовать топливно-энергетические ресурсы». Весьма актуальным является изыскание новых источников энергии, которые могут быть использованы в энергоемких технологических процессах. Таким источником, безусловно, станет атомная энергия. Черная металлургия — весьма выгодный для атомной энергетики потребитель, так как это наиболее масштабная отрасль. Общий расход тепла на производство 1 т стали по мере совершенствования технологии непрерывно снижался, главным образом за счет увеличения доли конвертерного производства совершенствования доменного процесса и других мероприятий. Однако ныне расход тепла стабилизировался на уровне 6,2 Гкал/т. Такой крупный потребитель тепла позволяет сооружать реакторы предельно высокой мощности, что, в свою очередь, снижает удельные капитальные вложения. Так, в проекте атомнометаллургического комплекса (10 млн. т стали), строительство которого планируется в Японии, предусмотрены многоцелевые реакторы общей мощностью (тепл.) 17 200 МВт. В настоящее время в 15 странах мира в том или ином масштабе ведутся исследования по проблеме использования атомной энергии в черной металлургии.

В работе академика Н. А. Доллежала и других сформулированы три основных направления технологического использования атомной энергии:

1. Промежуточное преобразование ее в электроэнергию и перевод технологии на электрохимические процессы.

2. Прямое использование тепла, вырабатываемого высокотемпературными реакторами.

### 3. Использование сопутствующего $\gamma$ -излучения для интенсификации технологических процессов.

Анализ показывает, что по крайней мере в ближайшей перспективе технология, вероятно, будет ориентирована на первое направление, хотя общий КПД АЭС, вырабатывающих только электроэнергию, около 38%. Развитие второго направления, позволяющего увеличить КПД, связано с созданием мощных высокотемпературных реакторов, что представляет собой сложную проблему. В Японии, например, срок создания промышленного высокотемпературного реактора отнесен на 2000 г., хотя первоначально его предполагали создать к 1990 г. Перенос срока ввода реактора в значительной мере связан с отсутствием пока надежных материалов (трубы, теплоизоляция, литье, поковки). О сложности проблемы говорит тот факт, что необходимо разработать сплавы (и технологию их изготовления), которые могли бы обеспечить ресурс изделий порядка 100 000 ч при температуре 900—1000°С и значительных нагрузках.

Еще более дальняя перспектива — технологическое использование сопутствующего  $\gamma$ -излучения. Правда, известны успешные попытки обработки полимеров и предварительные сообщения о возможности радиационной интенсификации процессов получения водорода, что представляет большой интерес для металлургии.

Промежуточное преобразование атомной энергии в электроэнергию с учетом принципиальных преимуществ атомной энергетики (независимость географического положения станций, высокая экологическая безопасность, получение концентрированных потоков энергии, более низкая себестоимость и др.) позволит эффективно развивать переплавные процессы, а также получать металлизированные материалы прямым восстановлением руд (концентратов) газами.

Из многочисленных способов восстановления железных руд газами наибольший интерес представляет, конечно, восстановление водородом в силу специфических особенностей, присущих этому процессу. И прежде всего это полная экологическая безопасность технологии, так как продуктами восстановления являются железный порошок и пары воды. Кроме того, восстановление окислов железа водородом протекает при минимальном уровне температуры по сравнению с аналогичным про-

цессом, использующим любые другие реагенты. Это определяет и наибольший ресурс оборудования. Наконец, продуктом восстановления является весьма чистое по примесям (особенно по сере и углероду) железо. Принципиальные достоинства водородного восстановления давно уже привлекают внимание исследователей. В течение более чем 20 лет изучаются в опытно-промышленном масштабе процессы водородного восстановления в реакторах с кипящим (псевдоожиженным) слоем. Такие реакторы, по крайней мере теоретически, наиболее эффективны, так как обеспечивают интенсивное перемешивание и уменьшение диффузионного сопротивления внутри частиц малого размера, равномерное распределение температуры. Большая величина активной поверхности теплообмена обуславливает и большую скорость теплопередачи. Скорость реакций в кипящем слое благодаря особенностям тепло- и массообмена и малым размерам частиц существенно выше, чем в других устройствах, при одинаковом уровне рабочей температуры.

Но на пути инженерной реализации этого интересного процесса встретились серьезные трудности. Прежде всего процесс требует значительного количества водорода ( $1200 \text{ м}^3/\text{т}$  при  $800^\circ \text{C}$ ). С увеличением температуры расход газа снижается, но при этом возрастает опасность слипания частиц восстановленного железа, нарушающего стабильность псевдоожижения. К сожалению, многие руды начинают слипаться при температуре  $600^\circ \text{C}$  и степени восстановления 20—30%, т. е. уже в самом начале процесса.

Эффективность использования водорода за один проход через слой руды или концентрата при оптимальной температуре не превышает 10%, а в конце процесса при степени металлизации 90—95% — всего 1%. Поэтому через реактор необходимо пропускать большие количества газа, значительно превышающие теоретический расход. Это приводит к большому выносу пыли и эрозии трубопроводов.

В наибольшей степени технология и оборудование водородного восстановления отработаны в процессе, получившем название ню-айрон-процесс, который протекает при  $480\text{—}540^\circ \text{C}$  и давлении водорода 30—35 ат. Объем циркулирующего газа достигает  $8000 \text{ м}^3/\text{т}$  железа. Скорость газа в реакторе, при которой возникает

кипящий слой, — 0,30—0,45 м/с. Используются многоподовые реакторы объемом до 115 м<sup>3</sup>, что позволяет получать порядка 100 т железного порошка в сутки. Имеются проекты реакторов диаметром до 7,0 м с производительностью до 2000 т/сутки. Газ приходится многократно нагревать, а всего газовая смесь циркулирует по контуру 8—12 ч, из-за чего эрозия оборудования вырастает в серьезную проблему. Для ускорения процесса пытаются на конечной стадии добавлять к водороду хлористый водород (от 0,5 до 8,5%). Однако это ухудшает условия работы оборудования, хотя и дает ощутимый эффект, повышая производительность.

Еще одно серьезное осложнение — пирофорность получаемого продукта, который необходимо охлаждать до 200°С во избежание возгорания. Предложены различные способы устранения пирофорности железного порошка: охлаждение в токе инертного газа, брикетирование, охлаждение водой, нагрев до 800—1000°С с последующим охлаждением в нейтральной среде.

Хранение порошка также является далеко не простой задачей. Однако несмотря на всю сложность собственно процесса восстановления железорудных материалов водородом, основной проблемой, конечно, остается получение достаточно дешевого водорода в количествах, допускающих осуществление металлургической технологии. Поэтому развитие «водородной металлургии» тесно связано с разработкой экономных способов крупномасштабного производства водорода. Именно на этом направлении должны быть сосредоточены усилия, тем более что это общая проблема развития водородной энергетики.

Академик И. А. Глебов, касаясь проблем водородной энергетики, недавно отметил: «В зарубежной печати много пишут о «водородной энергетике». Предлагают сооружать на островах в океане или на малонаселенном побережье атомные станции и путем электролиза разлагать воду на водород и кислород. Вместо электрического тока передавать по трубам водород и использовать его в промышленности, на транспорте, в быту.

Я не думаю, что это радикальный путь развития энергетики. Основная проблема: как добыть дешевый водород? Получение водорода из морской воды с помощью электролиза — весьма энергоемкий процесс.

Много трудностей и на путях освоения других способов выработки водорода. На транспорте, например, в самолетах, где в ограниченном объеме надо иметь запас энергии, использование водорода более перспективно, а в большой энергетике маловероятно, чтобы водород стал основным энергоносителем».

Действительно, стоимость водорода составляет от 3,0—4,0 коп/м<sup>3</sup> (конверсия газа) до 6,0 коп/м<sup>3</sup> (электролиз), т. е. доля топливной составляющей при производстве стали от 30 до 40 руб/т, тогда как ныне она не превышает 10—15 руб. Тем не менее вряд ли имеются основания для пессимизма в части развития водородной металлургии.

Новые способы получения водорода разрабатываются. Большие перспективы имеет так называемый двухстадийный плазмохимический цикл восстановления водорода из воды, предложенный И. Г. Белоусовым, В. А. Легасовым и В. Д. Русановым: деструкция на первой стадии молекулы CO<sub>2</sub> в плазмохимическом реакторе на кислород и окись углерода с последующим использованием СО в качестве восстановителя в реакции паровой конверсии. Двуокись углерода является в этом процессе нерасходуемым реагентом. Отмечается, что энергетические параметры процесса близки к традиционным параметрам электролиза воды, но предлагаемая технология менее металлоемка и имеет ряд других преимуществ.

Весьма интересные работы проводит в Институте проблем машиностроения АН УССР профессор И. Л. Варшавский с сотрудниками. Они пытаются получить водород при взаимодействии так называемых энергоаккумулирующих веществ (ЭАВ) с водой. Такими веществами могут быть сплавы, содержащие кремний, кальций, алюминий. Расчеты показывают, что из золы углей при восстановлении могут быть получены ЭАВ стоимостью 19,0—23,0 руб/т. При использовании ЭАВ для получения водорода с учетом утилизации энергии от побочных процессов стоимость 1 т водорода должна составлять 67,2—81,3 руб. (0,6—0,72 коп/м<sup>3</sup>). Если эти расчеты подтвердятся, то водородная металлургия получит прочную основу и сможет даже конкурировать с традиционными способами, поскольку стоимость энергоносителя будет вдвое ниже существующего уровня при полной его экологической безопасности.

Отметим также, что сырьевая база для получения ЭАВ весьма широка. В СССР ежегодно образуется до 80,0 млн. т золы, из которой может быть получено (при дополнительном расходе топлива) столь значительное количество ЭАВ и водорода, что это может обеспечить в перспективе резкое расширение масштабов водородной металлургии и соответственно масштабов получения высококачественных железных порошков.

Школа академика Н. Н. Рыкалина успешно разрабатывает процессы восстановления и рафинирования с использованием плазмотронов. Принципиальным преимуществом плазменной металлургии, которая самым тесным образом связана с атомной энергетикой, следует признать расширение температурных возможностей технологии и более высокую эффективность (в 5 раз) теплоотдачи плазменного пламени по сравнению с топливно-кислородным. Увеличение температурного уровня при использовании плазмы позволяет резко увеличить удельную производительность агрегатов, совместить процессы восстановления, рафинирования, направленной кристаллизации и в конечном счете снизить металлоемкость оборудования. Совершенствование процессов плазменной металлургии в сочетании с ожидаемым снижением стоимости энергии благодаря увеличению доли АЭС в энергетическом балансе может привести к концу века к радикальным изменениям в структуре черной металлургии.

Проиллюстрируем это утверждение кратким описанием весьма перспективного процесса одностадийного восстановления тонко измельченного железорудного концентрата в реакторе-плазмотроне, работающем на смеси водорода с природным газом. В подобном компактном реакторе окислы железа, попадая в струю плазмообразующего газа, практически мгновенно расплавляются и частично восстанавливаются: процессы довосстановления протекают в керамической емкости под слоем жидкого шлака, что гарантирует высокую степень рафинирования конечного продукта. Расход энергии составляет около 3000 кВт/т, а производительность опытной установки порядка 0,2 т/ч при мощности плазмотрона 1 МВт. Можно полагать, что мощность плазмотронов к концу века увеличится по крайней мере на порядок. Стало быть, станет возможным создавать мощные компактные агрегаты с несколькими ре-

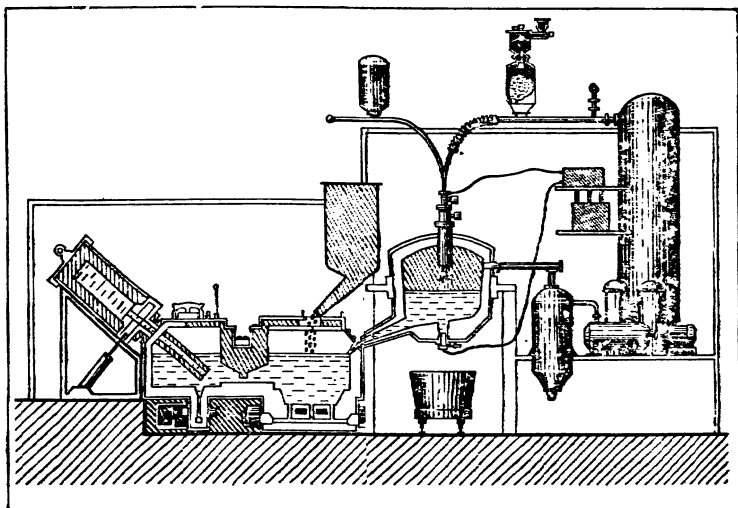


Рис. 5. Схема плазменно-водородного восстановления

акторами — плазмотронами и общей накопительной емкостью. Технически доступным на этой основе является и создание устройства, совмещающего операции плавления, восстановления, рафинирования с непрерывной отливкой заготовки.

Можно также полагать, что конечной стадией развития этого направления будет создание непрерывного процесса руда—прокат или руда—железный порошок. Вероятная схема такой технологии показана на рис. 5. Ее преимущества должны быть понятны читателям из предшествующего рассказа: полная экологическая безопасность, отсутствие отходов, компактность и малая металлоемкость оборудования, комфортные условия труда, высокое качество продукции, высокая производительность труда и др.

Однако для реализации этой «идеальной» технологии необходимо не только снизить стоимость водорода до 0,6—0,8 коп/м<sup>3</sup>, но и привлечь значительные энергетические мощности. Кроме того, необходимо резко увеличить производительность реакторов прямого восстановления, которые существенно уступают по этому параметру доменным печам. Полагают, что к концу века

максимальная суточная производительность доменных печей возрастет до 15—17 тыс. т в сутки, тогда как производительность самых мощных установок прямого восстановления вряд ли превысит 2,0—2,5 тыс. т в сутки. Даже с учетом более высокого качества конечной продукции, экологической безопасности и других достоинств метода преимущества производительности и низких расходов по переделу остаются на стороне традиционных процессов.

Не следует также забывать, что если стоимость водорода снизится до 0,8 коп/м<sup>3</sup>, станет целесообразным даже его вдувание в нижнюю часть шахты доменных печей в количестве до 470 м<sup>3</sup>/т. Это позволит на 140 кг/т сократить расход кокса при одновременном повышении производительности доменной печи на 30%, т. е. расход кокса в этом случае составит 270—280 кг/т, что в 1,8—2,0 раза меньше современного уровня. Кстати, эффект от вдувания водорода в доменные печи не ограничивается только уменьшением расхода дефицитного кокса; повышается качество чугуна. В частности, можно ожидать существенного снижения содержания серы в нем и соответственно улучшения качества стали. Стало быть, в понятие «водородной металлургии» необходимо включать не только процессы прямого восстановления, но и традиционные процессы. Задача заключается в том, чтобы не противопоставлять одно направление другому, а найти оптимальное решение их гармоничного развития.

Выше мы отмечали, что по классификации академика Н. А. Доллежала второе направление технологического использования атомной энергии предусматривает применение высокотемпературных реакторов с гелиевым теплоносителем. В качестве примера рассмотрим вариант, принятый к разработке за рубежом (рис. 6).

Гелий при температуре 1000°C под давлением 40 ат поступает в теплообменник, где отдает тепло циркулирующему по вторичному контуру газу (гелий, давление 45 ат, 925°C); от него тепло передается в агрегат для получения восстановительного газа и нагрева его до 850°C. Восстановительный газ поступает в шахтные печи для металлизации железорудных окатышей, причём газ, как это обычно практикуется, многократно циркулирует в системе.

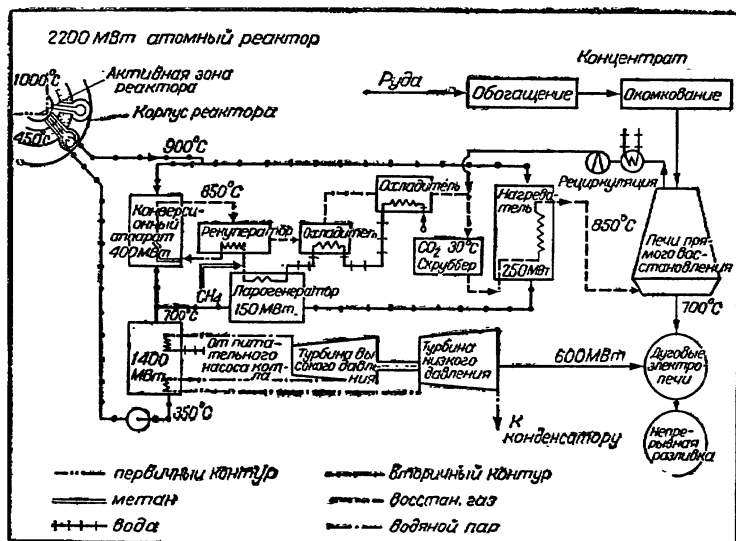


Рис. 6. Блок-схема использования ВТГР для прямого получения железа с использованием природного газа

Для получения восстановительного газа намечено использовать остатки вакуумной переработки нефти.

В настоящее время, судя по сообщениям печати, в Японии параллельно с экспериментами на реакторе мощностью 50 МВт и на установке для металлизации окатышей при высоком давлении (суточная производительность установки 2000 т) разрабатывается проект крупного интегрированного металлургического комплекса с АЭС суммарной электрической мощностью 4800 МВт, из которых 2565 МВт потребляется на месте, а остальная мощность реализуется на стороне). В технологической части проектируемого комплекса намечается создать:

18 реакторов прямого восстановления, из которых в работе постоянно будут находиться 15, что обеспечит суточное производство 30 000 т металлизированных окатышей;

3 дуговые электропечи по 300 т каждая, снабженных трансформаторами по 170 Мва с годовым производством 10,0 млн. т электростали;

глиноземное производство (0,6 млн. т) и электро-

лиз глинозема с получением 0,3 млн. т первичного алюминия;

завод по крекингу нефтепродуктов (5,0 млн. т в год);

опреснительную установку на 1 млн. м<sup>3</sup> морской воды в сутки с получением 0,17 млн. т в год каустической соды.

Предполагается, что комбинат займет площадь порядка 1900 га и будет эксплуатироваться практически без людей, занятых непосредственно производством. Автоматическое управление будет осуществляться прямо в производственной линии в реальном масштабе времени.

Жилой район располагается согласно проекту в 5 км от комбината. Причем вся территория между комбинатом и жилым массивом должна быть озеленена.

Страны «Общего рынка» объединили свои усилия в разработке проектов в области атомной металлургии в «Европейском клубе атомной черной металлургии». В США 10 крупнейших металлургических фирм создали новую компанию с целью разработки проблем и координации использования атомной энергии в черной металлургии. В целом в данной области идут интенсивные экспериментальные и предпроектные проработки, на что уже только в Японии израсходовано свыше 100 млн. долларов.

Один из принципиальных вопросов — выбор расположения реактора. Специалисты после длительного обсуждения пришли к выводу о необходимости разделить реактор и металлургическое предприятие. Но в этом случае не используются многие преимущества высокотемпературного реактора, поскольку восстановительный газ при поступлении на металлургический завод придется снова подогревать.

Интенсивно разрабатывается и проблема получения водорода с помощью тепловой энергии высокотемпературного реактора; ее используют в так называемом сернокислотном цикле или при высокотемпературном электролизе. И тот и другой способ снижают стоимость водорода по сравнению с существующими способами, однако еще весьма далеки от промышленного использования. Тем не менее можно с уверенностью сказать, что одним из основных этапов атомной металлургии непременно будет восстановление железорудных

материалов водородом, полученным тем или иным способом с использованием энергии АЭС.

В какой мере, когда и каким образом использование атомной энергии повлияет на металлургию качественных сталей? Большинство специалистов считают, что это произойдет во всяком случае после 2000 г. Однако надвигающийся энергетический кризис может ускорить решение проблемы и изменить сроки.

Создание ядерно-металлургических комплексов (ЯМК) для получения больших количеств металлизированных окатышей повлияет на структуру черной металлургии и ее технико-экономические показатели, вероятно, следующим образом:

производительность труда на ЯМК может быть на порядок выше, чем на лучших современных заводах, т. е. достигнет 12,0—15,0 тыс. т на работающего в год;

улучшится экологическая обстановка в металлургических центрах (вследствие отсутствия коксохимического и аглодоменного производства);

снизится материалоемкость металлургии в целом и объем перевозок;

увеличение в общем балансе металла доли металлизированных окатышей (первородная шихта) приведет к улучшению качества и увеличению надежности металла благодаря меньшему содержанию в них неконтрольных примесей, а также к снижению уровня загрязнения шихты;

существенно увеличатся рентабельность, фондоотдача и другие технико-экономические показатели отрасли;

радикально изменятся условия труда в горячих цехах и сократится их количество, особенно при более широком использовании порошковой технологии.

\* \* \*

Вопросы, которые кратко отражены в этой брошюре, конечно, не исчерпывают всего комплекса проблем металлургии качественных сталей, многообразия, используемых и намечаемых к использованию технологических приемов. Основная задача, которую старался решить автор, — привлечь внимание специалистов главным образом смежных отраслей техники к нерешенным, но перспективным проблемам металлургии качественных сталей, ибо сегодня как никогда ощущается острая потребность в новых, нетривиальных решениях.

## Литература

Целиков А. И. Пути экономии металлов. М., «Машиностроение», 1974.

Поляк А. М. Улучшение использования металла в народном хозяйстве СССР. М., «Наука», 1971.

Пашко И. Г. Вопросы экономики, 1970, № 7.

Мырцымов А. Ф. Черная металлургия капиталистических и развивающихся стран. Киев, «Наукова думка», 1978.

Байнхауэрх Х., Шмаке Э. Мир в 2000 г. М., «Прогресс», 1973.

Целиков А. И. Литейно-прокатные агрегаты. Труды ВНИИМЕТМАШ, 1975, № 41.

Майерс С. К. Вакуумная металлургия. Пер. с англ. М., «Металлургия», 1973.

Гуттерман К. Д. и др. Плазменные процессы в металлургии и технологии неорганических материалов. М., «Наука», 1973.

Лакомский В. И. Плазменно-дуговой переплав. Киев, «Техника», 1974.

Медовар Б. И. и др. Электрошлаковые печи. Киев, «Наукова думка», 1976.

Сб. Вопросы атомной науки и техники. Серия «Атомно-водородная энергетика», вып. 1—5. М., 1976—1979.

Калюжный Д. Н. и др. Гигиена внешней среды в районе размещения промышленных предприятий. Киев, «Здоровье», 1973.

Александр Абрамович ВЕРТМАН

КАЧЕСТВЕННАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ, ГОД 1999

Гл. отраслевой редактор В. П. Демьянов

Редактор Г. И. Флиорент

Мл. редактор Т. Г. Иншакова

Обложка художника А. А. Смирнова

Худож. редактор Т. С. Егорова

Техн. редактор А. М. Красавина

Корректор В. В. Каночкина

ИБ № 2777

Сдано в набор 4.02.80 г. Подписано к печати 5.03.80 г. Т 01357. Формат бумаги 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Бумага № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Уч.-изд. л. 3,52. Тираж 52 620 экз. Заказ № 269. Цена 11 коп. Издательство «Знание». 101535, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 804404.

Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

