

УДК 620.186; 620.17

ОСНОВНЫЕ ПУТИ И НЕКОТОРЫЕ ИТОГИ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ СКОРОСТНОГО ТЕРМОУПРОЧНЕНИЯ СТАЛЕЙ

С.А. Астанчик, С.П. Ошкадеров

Важнейшим требованием, предъявляемым к конструкционным материалам массового применения, является их надежность в изделии, что обеспечивается оптимизацией свойств их прочности и пластичности, а также экономичность и экологическая чистота технологических процессов их обработки. Решить эту задачу в рамках единого комплекса организационно-технических мероприятий можно лишь на основании глубокого научного исследования внутренней природы металла, закономерностей формирования его структуры при всех технологических операциях его производства и связи этой структуры со свойствами готового изделия.

An important requirement applied to construction materials of mass use is their reliability in a product, provided by optimization of their strength and plasticity properties, and economy and ecological cleanness of their treatment technological processes. The solution of this problem within the framework of the single complex of the organizational and technical activities is possible only on the basis of a deep scientific research of internal nature of metal, principles of the metal-structure formation during all technological operations of metal fabrication and connection of this structure with properties of the finished product.

ВВЕДЕНИЕ

Скоростная электротермическая обработка сталей и сплавов (СЭТО) существенно образом расширила представления о возможностях повышения служебных характеристик металлов посредством создания заданных структурно-фазовых комплексов, которые наиболее полно удовлетворяют требованиям теории конструкционной прочности. С ее помощью можно заметно повысить уровень физико-механических свойств, превышающий получаемый при использовании традиционных методов обработки. СЭТО является эффективным средством управления свойствами сталей с исходной равновесной структурой, формирующейся при нестационарных условиях нагрева. Еще более действенной она оказывается, если операции СЭТО проводятся с металлом в метастабильных, далеких от равновесия, состояниях.

Наиболее эффективное воздействие оказывает СЭТО при обработке сталей с исходными неравновесными состояниями, получаемыми, на-

пример, за счет деформации или посредством закалки. Здесь целесообразно выделить те направления исследований, которые позволяют глубже понять природу процессов структурообразования и обосновать выбор схем новых технологий обработки.

Дальнейшее развитие работ по другим направлениям, которые не охватывают в данной работе полностью проблематику СЭТО как в теоретическом, так и прикладном значении, преследует цель получить новые стимулы для совершенствования технологий СЭТО и создания нового технологического оборудования, повышения общей культуры термообработки производства в целом.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Фазовые и структурные превращения в сталях и сплавах характеризуются многостадийностью с разными временами релаксации каждой из стадий. Управление кинетикой их протекания позволяет получить промежуточные неравновесные состояния с комплексом физико-механических свойств, который не может быть достигнут при

использовании традиционных методов термического упрочнения. Изучены кристаллоструктурный и концентрационный аспекты механизма и кинетика фазовых превращений в условиях нестационарного теплового воздействия с учетом качества и уровня легирования металла, исходной структуры и условий нагрева. Определены задачи в области исследования структурной генетики с выявлением факторов, определяющих структурную наследственность при различных механизмах фазовых превращений при эпитаксиальном росте новой фазы и фазовых превращениях, осложненных распадом метастабильных фаз в процессе нагрева.

Закономерности изменения структурного и концентрационного состояния матричного металла и гетерогенизирующих его фаз, их морфологии и дисперсности в результате воздействия различных внешних факторов (деформация, температура и скорость нагрева, исходная структура), уровень и качество легирования (класс стали, тип твердого раствора, характер второй фазы и т. д.) были использованы для создания новых высокоэффективных технологий и оборудования для изготовления деталей и узлов изделий в машиностроительной промышленности, металлургии и при выпуске изделий специального назначения.

Важнейшим требованием, предъявляемым к конструкционным материалам массового применения, является их надежность в изделии, что обеспечивается оптимизацией свойств их прочности и пластичности, а также экономичность и экологическая чистота технологических процессов их обработки. Решить эту задачу в рамках единого комплекса организационно-технических мероприятий можно лишь на основании глубокого научного исследования внутренней природы металла, закономерностей формирования его структуры при всех технологических операциях его производства и связи этой структуры со свойствами готового изделия.

На основе исследования физической природы явлений, происходящих при нагреве в диапазоне скоростей 10^1 – 10^5 град/с, были выявлены основные факторы, обуславливающие высокую конструкционную и эксплуатационную прочность и технологическую пластичность металлических материалов, и определены пути реализации этих свойств при специальных видах термообработки. Все это позволило пересмотреть многие устоявшиеся положения классического металловедения

и показать, что традиционные методы формирования структуры, использующие условия близкие к равновесным, в большинстве своем являются не лучшими, т. к. не позволяют достигать предельных значений свойств, определяемых уровнем и качеством легирования сталей. Общие закономерности и механизмы фазовых и структурных превращений в многофазных материалах при скоростном (индукционном, контактном, лазерном и других видах) нагреве позволили решить практические задачи упрочняющей и разупрочняющей термообработки полуфабрикатов и изделий, повысить конструкционную прочность на 15–30 %, жаропрочность и технологическую пластичность в 1,5–2,0 раза, увеличить надежность ряда ответственных изделий.

Показано, что путем целенаправленного воздействия на структурный комплекс можно получить такие характеристики прочности и пластичности, достичь которые при использовании традиционных методов удастся путем использования высоколегированных сталей, в частности, мартенситостареющих, как это наблюдается в зарубежной, например, в американской технологии.

Попыткам широкого применения этих сталей для изготовления деталей авиационной техники препятствуют трудности, связанные с проблемой преодоления сильной склонности сталей данного класса к ликвации, сложность металлургической технологии их выплавки, препятствующие получению крупных поковок. К этим трудностям следует добавить чрезвычайно высокую стоимость этих сталей, содержащих много остродефицитных легирующих элементов (никеля, кобальта и др.).

Вместе с тем соединение теории скоростной термической обработки с практикой термоупрочнения сложных изделий из хорошо освоенных отечественной промышленностью сталей позволило создать новое прогрессивное направление в технологии и решить проблему выпуска ряда изделий с требуемой надежностью и ресурсом. Вместе с тем естественно была выдвинута задача создания новых экономнолегированных конструкционных сталей, специально предназначенных для реализации новых технологических схем СЭТО.

По существу, речь идет о работах, которые стимулировали подобные широкие исследования в нашей стране и за рубежом и оказали решающее влияние на развитие технологической культуры в области упрочнения сталей и сплавов во многих

отраслях машиностроения. К настоящему времени на предприятиях разных отраслей созданы и действуют технологии и оборудование, обеспечивающие технический и экономический эффект, который не может быть получен при использовании традиционных технологий. Достигается это путем целенаправленного управления метастабильными фазовыми и структурными превращениями в сталях и сплавах, которые явились тем ключевым звеном, овладев которым удалось создать комплекс прогрессивных технологических процессов в ряде отраслей промышленности, производящих в массовых количествах изделия общего и специального назначения, для которых эксплуатационная надежность является требованием первоочередной важности.

Их научной базой явились работы в области металлофизики, охватывающие метастабильные явления в металлах и сплавах при быстром нагреве. Физическая сущность такого положения обусловлена тем принципиальным обстоятельством, что по своей природе высокопрочные состояния в металлах являются в термодинамическом отношении неустойчивыми, метастабильными и формируются такие состояния путем последовательных метастабильных твердофазных и структурных превращений, в которых фактор контролируемой диффузией кинетики играет решающую роль. Познание природы и закономерностей этих внутренних превращений, происходящих как при нагреве, так и при охлаждении сплавов, раскрытие принципиально важной роли скорости процесса в этих явлениях явились необходимой предпосылкой разработки прогрессивных схем их термической обработки, позволивших в максимальной степени реализовать внутренние резервы служебных свойств, заложенные в структуре металла. Таким образом, физика метастабильных явлений явилась научной базой наиболее прогрессивных видов современной технологии термической обработки, обеспечивших практическое решение важнейших заданий по выпуску ответственных изделий современной техники и давших большой народнохозяйственный эффект.

Ниже изложены некоторые итоги работ по развитию научных основ получения высокопрочных структурных состояний в сталях и сплавах и приведен ряд примеров практического воплощения этих научных идей в виде прогрессивных технологических процессов упрочнения сталей и

сплавов, обеспечивших серийный выпуск высокопрочных изделий авиационной техники, машиностроения и металлургического производства.

I. СОЗДАНИЕ НОВЫХ ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Применение материала с высокой прочностью для конструирования деталей и узлов с одновременным обеспечением их высокой надежности при работе в условиях сложнапряженного состояния является эффективным путем снижения массы конструкции при заметном повышении технических характеристик изделий. Опыт отечественной и зарубежной науки и техники показывает, что повышение прочностных характеристик материала до определенного уровня сопряжено со значительным повышением чувствительности материала к хрупкому разрушению в условиях сложнапряженного состояния. Если в условиях одноосного растяжения на современных конструкционных сталях за счет легирования и упрочнения удается обеспечить предел текучести более 300 кгс/мм², то при переходе к сложнапряженному состоянию (двух- или трехосному) у стали наблюдается склонность к хрупкому, как правило, преждевременному разрушению уже при уровне прочности $\sigma_B = 150\text{--}170$ кгс/мм².

На основе большого экспериментального материала по упрочнению изделий из высокопрочных сталей с использованием традиционных методов термообработки (нагрев в шахтных агрегатах или шахтных электропечах) и альтернативной скоростной электротермической обработки были сделаны нижеследующие выводы.

1. Увеличение конструкционной прочности имеет место лишь до определенного уровня, выше которого зона ее рассеивания заметно расширяется до таких пределов, что нижние значения конструкционной прочности оказываются меньше значений предела прочности материала, определенного при одноосном растяжении.

2. Упрочнение скоростной электротермической обработкой позволяет обеспечить более высокие значения конструкционной прочности по сравнению со стандартной термообработкой. При этом зона стабильных значений конструкционной прочности оболочек достигает более высокого уровня. Изучение влияния способов упрочнения на конструкционную прочность подтвердило определяющее значение структурных

факторов в обеспечении стабильных и высоких значений конструкционной прочности.

Поэтому решение проблемы повышения конструкционной прочности в ее технологическом плане было сделано с упором на совершенствовании технологии термообработки деталей, создании новых высокоэффективных сталей и методов их упрочнения.

С учетом этих предпосылок, методология создания новых высокопрочных сталей основывалась на следующих основных требованиях:

- возможность получения мелкодисперсной структуры, гетерогенизированной высокодисперсной упрочняющей фазой;
- возможность достижения заданного концентрационного состояния аустенита в условиях непрерывного нагрева со скоростями 10–200 град/с;
- хорошие технологические свойства при формообразовании;
- высокая прочность при малой чувствительности к концентраторам напряжений;
- работоспособность при температурах 200–450 °С;
- невысокая себестоимость.

Изготовление стали методами прямого восстановления, выплавка в вакуумно-индукционных печах с продувкой расплава аргоном с последующим переплавом в вакуумно-дуговых печах, электрошлаковым переплавом и явились эффективным средством не только для получения природной мелкозернистой стали, весьма чистой по содержанию вредных примесей. Такие усилия при изготовлении стали для СЭТО полностью себя оправдали.

Вышеперечисленным требованиям к структуре удовлетворяют созданные ВИАМ совместно с НИАТ высокопрочные конструкционные стали мартенситного класса, которые позволяют обеспечить высокие и стабильные значения конструкционной прочности.

Эти стали обладают мелкозернистой и мелкодисперсной структурой уже в исходном состоянии. К тому же они весьма технологичны: хорошо подвергаются холодному и горячему деформированию, обеспечивают высокие свойства сварного соединения, обладают хорошей закаливаемостью (отсутствие промежуточных продуктов распада, высокая прокаливаемость и т. д.) при охлаждении в процессе закалки в масле и на воздухе, что немаловажно при упрочнении изделий по технологическим схемам скоростной электротермиче-

ской обработки. Содержание углерода в этих сталях лежит в пределах от 0,32 до 0,42 %.

Таким образом, на основе теоретических разработок в области метастабильных превращений в сталях с использованием целенаправленного комплексного легирования и совершенствования технологии выплавки были созданы новые экономнолегированные высокопрочные стали, применение которых позволило получить конструкционную прочность изделий, упрочняемых с использованием методов скоростного нагрева на уровне $\sigma_B^K \geq 220$ кг/мм².

II. ПРИМЕРЫ ПРОГРЕССИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ШИРОКО ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В НАРОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

В настоящее время широкое применение нашли следующие прогрессивные технологии:

- поверхностная и объемная закалка с использованием скоростного нагрева (ТВЧ, электроконтактный, электроннолучевой, плазменный и др.);
- скоростной отпуск и скоростное старение закаленных сталей и сплавов, скоростной отжиг деформированных металлов;
- локальный скоростной отжиг сварных соединений различных конструкций из сталей и сплавов широкого сортамента;
- термофиксация и термоправка деталей и конструкций, совмещенная со скоростным отжигом;
- предварительная термомеханическая обработка с применением скоростных нагревов на операциях после деформационного отжига и закалки;
- термообработка проката, совмещенная с пластической деформацией и последующей закалкой;
- скоростная термообработка профиля и др.

Все эти процессы объединяет между собой и одновременно отличает от традиционных процессов с применением медленных печных нагревов то, что они обеспечивают создание равномерной по объему высококачественной структуры и субструктуры, отличающейся мелкодисперсностью, дисперсностью вторичных составляющих, метастабильностью отдельных фаз, удовлетворяя требованиям, предъявляемым к структурному комплексу теорией прочности. Это служит гарантией получения оптимального уровня физико-механических характеристик, обуславливает повышенный ресурс и надежность конструкций.

Эффективность вышеперечисленных техпроцессов постоянно растет за счет применения усовершенствованных методов и способов обработки. Только в авиационной и машиностроительной промышленности обработке по вышеперечисленным техпроцессам подвергается разнообразнейшая и широкая номенклатура деталей и конструкций:

- втулки, шестерни, разнообразные валы, обоймы и др.;
- крупногабаритные детали, в т. ч. прокатные валы, и детали экскаваторов;
- различного рода тонкостенные цилиндры, шар-баллоны, работающие под высоким давлением и изготовленные из различных материалов;
- крупногабаритные детали летательных аппаратов, например лонжероны лопасти вертолета;
- прокат черных металлов, в т. ч. автолист и трансформаторная сталь;
- широкая номенклатура деталей спецназначения и др.

Скоростной термической обработке подвергаются стали мартенситного, аустенитного и переходного классов, доэвтектоидные, эвтектоидные и заэвтектоидные стали, титановые ($\alpha + \beta$), никелевые и ниобиевые жаропрочные и пружинные сплавы, бронзы и латуни и др.

Эффективность новых техпроцессов, созданных на основе СЭТО, по сравнению с традиционными термическими процессами с медленным нагревом в электропечах характеризуется следующими технико-экономическими показателями:

- обеспечивается качественная структура и субструктура металла, высокие физико-механические характеристики и конструкционная прочность, существенно повышающие ресурс и надежность машин и механизмов;
- достигается высокая степень механизации и автоматизации за счет применения автоматических систем управления технологическим процессом: АСУТП и робототехнических комплексов с широким использованием систем автоматического проектирования при создании техпроцессов;
- обеспечивается почти десятикратное повышение производительности труда при одновременном повышении его культуры;
- расход электроэнергии уменьшается более чем в 20 раз;
- решаются проблемы защиты окружающей среды.

III. НЕКОТОРЫЕ ВНЕДРЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СЭТО

Новые технологические процессы с использованием скоростной электротермической обработки широко внедрены практически во всех отраслях народного хозяйства. Только на предприятиях Минавиапрома СССР было создано 30 участков для скоростной термообработки. В качестве примера достаточно привести разработку и внедрение технологии СЭТО изделий из высокопрочной стали в г. Екатеринбурге и лонжеронов на Ростовском вертолетном ПО. Новые технологии позволили значительно увеличить ресурс изделий, повысить производительность труда в 7–10 раз, автоматизировать основные операции термообработки, создать высокомеханизированные и автоматизированные цехи и участки термообработки, резко повысить культуру производства. Была решена проблема скоростного отжига особотонкостенных труб и листовых полуфабрикатов из нержавеющей специальных сплавов, сталей и цветных сплавов на медной основе толщиной в пределах от десятых долей миллиметра до десятков микрон. На предприятиях такого рода производства предъявляются очень высокие требования к структуре. Была разработана технология скоростного отжига, обеспечивающую получение мельчайшего регламентированного зерна размером от 5 до 10 микрон, т. е. почти на порядок меньше в сравнении с обычным отжигом. Такая задача не могла быть решена обычными приемами. Сложной задачей в таких случаях является и защита поверхности при нагреве.

Были разработаны и внедрены технология и автоматическое оборудование для скоростной закалки, отжига и старения, позволивших внедрить высокопроизводительные технологии закалки и термофиксации полуфабрикатов и изделий в производстве сильфонов и упругих чувствительных элементов на Саранском приборостроительном заводе и Смоленском опытном заводе «НИИ Теплоприбор», Тульском спецпредприятии. Эти технологии позволили получить миллионы сильфонов высокого качества с циклической прочностью, увеличенной в 2 раза, ликвидировать брак при формовке, исключить операции промежуточного травления, автоматизировать процесс термообработки. На технологию скоростного отжига и автоматическую установку для термообработки сильфонов получены патенты США,

Японии и Франции. На Новолипецком металлургическом комбинате внедрена технология производства трансформаторной стали с использованием скоростного нагрева, который обеспечил высокую скорость рекристаллизации и высокую степень обезуглероживания, что принципиально решало вопрос о возможности исключения длительного (160 ч) «черного» отжига и совмещения обезуглероживания с рекристаллизационным отжигом после первой холодной прокатки. Это дало возможность увеличить скорость перемещения полосы и сократить технологический цикл до 5–10 мин, полностью исключив «черный» отжиг, что значительно повысило качество трансформаторной стали и увеличило процент выхода стали высших марок.

На Новолипецком металлургическом комбинате также была решена важная народнохозяйственная проблема получения качественного автолиста с использованием отжига на непрерывном скоростном агрегате с учетом действующих технологий выплавки и прокатки. Было установлено, что благоприятная для штампуемости структура стали в процессе ее скоростного отжига формируется при условии разделения процессов рекристаллизации и выделения нитридов алюминия из пересыщенного твердого раствора.

Проведенная сравнительная оценка качества металла, полученного по разработанной и внедренной технологии непрерывного отжига автолиста, показала, что отечественный металл по своим качествам не уступает металлу известных зарубежных фирм. Это позволило полностью отказаться от закупки импортного автолиста.

Разработаны научные основы и создана с применением скоростного электронагрева принципиально новая технология изготовления упругих элементов специального назначения из трудно-

деформированных сплавов на ниобиевой основе ЛН-1, работающие при температурах до 1100 °С, жаропрочных релаксационноустойчивых сплавов на никелевой основе для работы в интервале температур от –253 °С до 800–850 °С.

IV. НОВОЕ СЕРИЙНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ИСПОЛЬЗУЕМОЕ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМАХ СКОРОСТНОГО ТЕРМОУПРОЧНЕНИЯ

Основные требования, которым должно удовлетворять технологическое оборудование, вытекают из необходимости создания высокопроизводительных, ресурсосберегающих процессов, которые имеют высокую степень автоматизации при выполнении всех операций по гибким производственным связям и работают в условиях непрерывного производства. При этом должна быть эффективно решена проблема защиты окружающей среды и использование ЭВМ при подготовке производства и выборе оптимальных решений при определении параметров обработки.

Для осуществления процессов скоростной термообработки только в Минавиапроме разработаны технологии и комплекс технологического оборудования, включающий серию автоматизированных установок различного назначения для закалки длинномерных, разностенных труб; для скоростного с использованием косвенного индукционного нагрева отпуска длинномерных, разностенных труб; линия термообработки (закалки и отпуска) толстостенных заготовок с использованием косвенного индукционного муфельного нагрева; для закалки и скоростного рекристаллизационного отжига тонкостенных разнотолщинных деталей; для индукционного отпуска сварных швов (кольцевых, спиральных, долевых, а также фланцев); для термофиксации и отпуска титановых и стальных тонкостенных оболочек.

Литература

1. Физические основы электротермического упрочнения стали / В.Н. Гриднев [и др.]. — Киев: Наукова думка, 1973.
2. Технологические основы электротермической обработки стали / В.Н. Гриднев [и др.]. — Киев: Наукова думка, 1977.
3. Садовский, В.Д. Структурная наследственность в стали / В.Д. Садовский. — М.: Металлургия, 1973. — (Удостоена Золотой медали Академии Наук СССР им. Д.К. Чернова, 1976 г.).
4. Астапчик, С.А. Термокинетика рекристаллизации / С.А. Астапчик. — Минск: Наука и техника, 1968.
5. Астапчик, С.А. Электротермообработка сплавов с особыми свойствами / С.А. Астапчик, Н.М. Бодяко. — Минск: Наука и техника, 1977.
6. Белянин, П.Н. Промышленные работы / П.Н. Белянин. — М.: Машиностроитель, 1975.
7. Белянин, П.Н. Гибкие производственные комплексы / П.Н. Белянин. — М.: Машиностроитель, 1984.