



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-72-80>
УДК 621.785.5

Поступила 27.11.2023
Received 27.11.2023

ПУТИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ И ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ СТАЛЕЙ ЗА СЧЕТ УСКОРЕНИЯ ДИФФУЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

В. М. КОНСТАНТИНОВ, БНТУ, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: vm.konstantinov@bntu.by
В. А. КУКАРЕКО, ГНУ ОИМ НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. Академическая, 12.
E-mail: v_kukareko@mail.ru

Проанализированы некоторые технико-экономически эффективные пути энергосбережения в процессах термической и химико-термической обработки сталей. Предложена классификация путей энергосбережения за счет активизации структурно-фазовых превращений в сталях. Обобщены результаты работ по ускорению диффузионных процессов в сталях при их термическом улучшении, термоциклической обработке, термодиффузионном цинковании, азотировании и цементации. Отмечен высокий потенциал энергосбережения и повышения производительности за счет сокращения времени термической и химико-термической обработки.

Ключевые слова. Конструкционные стали, термическая обработка, химико-термическая обработка, ускорение диффузионных процессов структурообразования.

Для цитирования. Константинов, В. М. Пути энергосбережения при термической и химико-термической обработке сталей за счет ускорения диффузионных процессов / В. М. Константинов, В. А. Кукареко // Литье и металлургия. 2023. № 4. С. 72–80. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-72-80>.

WAYS OF ENERGY SAVING DURING THERMAL AND CHEMICAL-THERMAL TREATMENT OF STEEL DUE TO ACCELERATION OF DIFFUSION PROCESSES

V. M. KONSTANTINOV, BNTU, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: vm.konstantinov@bntu.by
V. A. KUKAREKO, United Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 12, Akademicheskaya str. E-mail: v_kukareko@mail.ru

Some technical and economically effective ways of energy saving in the processes of thermal and chemical-thermal treatment of steels are analyzed. A classification of ways to save energy by activating structural-phase transformations in steels is proposed. The results of work on accelerating diffusion processes in steels during thermal improvement, thermal cycling treatment, thermal diffusion galvanizing, nitriding and carburization are summarized. A high potential for energy saving and increased productivity by reducing the time of thermal and chemical-thermal treatment was noted.

Keywords. Structural steels, heat treatment, chemical-thermal treatment, acceleration of diffusion processes of structure formation.

For citation. Konstantinov V. M., Kukareko V. A. Ways of energy saving during thermal and chemical-thermal treatment of steel due to acceleration of diffusion processes. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 4, pp. 72–80. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-4-72-80>.

Введение

Проблема снижения энергозатрат при объемном и поверхностном упрочнении сталей в современных условиях является чрезвычайно актуальной задачей. В условиях СНГ энергоемкость производства продукции машиностроения по-прежнему существенно выше, чем в развитых странах. Очевидно, что энергосбережение и рациональное энергопотребление выдвигается в число актуальнейших задач стратегии развития экономики государства. В машиностроении и металлургии важным фактором, оказывающим влияние на качество и долговечность деталей, является их термическая (ТО) и химико-термическая обработка (ХТО). В структуре себестоимости многих изделий машиностроения термообработка занимает существенное место.

Традиционно реализация энергосберегающих технологий ТО и ХТО проводится путем закупки и введения в эксплуатацию нового энергосберегающего термического оборудования. В свое время

в Беларуси была выполнена Государственная программа переоснащения литейных, кузнечных, термических, гальванических и других энергоемких производств [1]. В современных условиях данное направление труднореализуемо. Эффективным также является оптимизация технологических процессов загрузки термического оборудования. Отмечено, что уменьшение загрузки печи до 25–30% приводит к снижению КПД почти в 4 раза [2]. Однако следует отметить, что потенциал энергосбережения за счет оптимизации режимов и разработки новых технологий ТО и ХТО значительно превышает возможности энергосбережения за счет закупки современного оборудования. Во многих случаях фактором, лимитирующим энергоэффективность процессов ТО и ХТО, выступают процессы диффузионного массопереноса в сплавах при их ТО (например, гомогенизация аустенита), а также диффузия легирующего элемента при ХТО и др. Особую актуальность проблема энергосбережения приобрела в связи с возникновением парадоксальной ситуации, когда колоссальный массив научно-технических разработок в области ХТО оказался невостребованным промышленным сообществом именно из-за высокой продолжительности и энергоемкости процессов ХТО, а также вследствие того, что далеко не все исследованные технологические приемы ускорения реализуемы в производственных условиях. В связи с этим следует различать технологически осуществимые приемы и потенциально перспективные технологии, опробованные в лабораторных условиях (рис. 1). Ускорению процессов химико-термической обработки посвящены многочисленные исследования. Однако лишь часть из них (причем часть меньшая) представляет промышленный интерес. Еще меньшая часть известных путей интенсификации применяется в промышленных условиях. Наряду с очевидными субъективными причинами существуют и объективные причины неприятия лабораторно-исследовательских приемов интенсификации диффузионных процессов.

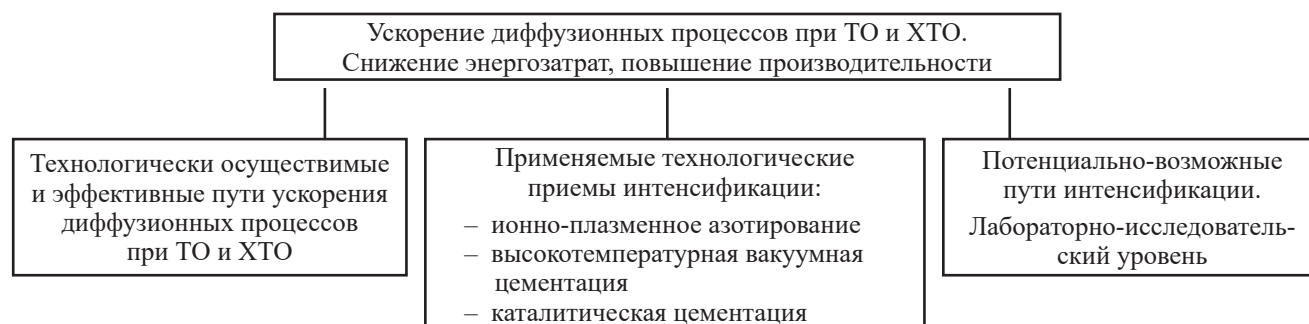


Рис. 1. Реализуемость различных приемов ускорения диффузии при ХТО и ТО

В статье изложены некоторые обобщенные результаты многолетних работ авторов в области ускорения диффузионных процессов при ТО и ХТО, которые могут быть положены в основу ряда технологических методов энергосберегающей обработки [3]. Анализируемые пути ускорения диффузионных процессов связаны в первую очередь со структурно-фазовыми превращениями при ТО и ХТО (рис. 2).

Ускорение структурно-фазовых превращений при термической обработке

Как правило, при термической обработке сталей наиболее длительными и энергозатратными являются процессы нагрева и изотермической выдержки изделий. Очевидно, что с повышением температуры печного пространства процессы теплопередачи и образования аустенита активизируются. Вместе с тем психологическим препятствием к перегреву при аустенизации сталей является традиционное мнение о существенном ухудшении механических свойств изделий, подвергнутых высокотемпературной обработке, и, в частности, снижение их ударной вязкости. Данное утверждение для современных сталей является справедливым лишь частично. Фактическое снижение содержания серы и фосфора в современных конструкционных сталях в существенной степени снижает остроту проблемы перегрева. Работы, выполненные на кафедре «Материаловедение в машиностроении» (доцент Э.Д. Щербаков), позволили установить, что наличие более крупного зерна аустенита при пониженном содержании в стали серы и в особенности фосфора не приводит к катастрофическому охрупчиванию стали [4] после операции термического улучшения (табл. 1). В частности, сегрегация горофильного фосфора на зернограницные поверхности при пониженном содержании этой примеси в качественной стали 40Х также существенно снижается [4]. Поэтому катастрофического охрупчивания таких сталей при перегреве не наблюдается. Для перспективных микролегированных наследственно мелкозернистых сталей это влияние будет еще меньше. Кроме того, регистрируется некоторое снижение разброса значений ударной вязкости для



Рис. 2. Некоторые направления энергосбережения при ТО и ХТО за счет ускорения диффузионных процессов

случая повышенных температур аустенизации стали, что в совокупности позволяет проводить корректировку режимов ТО качественных конструкционных сталей в сторону некоторого увеличения температур и снижения продолжительностей изотермической выдержки при гомогенизации. Тенденция снижения содержания вредных примесей в качественных конструкционных сталях, характерная для последних десятилетий, также способствует повышению температур изотермической выдержки под закалку.

Таблица 1. Влияние температуры нагрева под закалку стали 40X на изменение механических свойств после термического улучшения

Температура нагрева под закалку, °C	Твердость после закалки HRC	Температура отпуска, °C	Твердость после отпуска HRC	Ударная вязкость KCU, МДж/м ²
850	52	550	32	0,84 ± 0,28
	54	600	30	1,04 ± 0,12
	54	650	26	1,37 ± 0,23
900	54	550	33	1,08 ± 0,26
	54	600	30	0,97 ± 0,19
	55	650	26	1,175 ± 0,19
950	50	550	32	0,81 ± 0,09
	52	600	30	1,18 ± 0,08
	53	650	27	1,4 ± 0,06

Анализ ранее выполненных исследований свидетельствует, что в ряде случаев возможно уменьшение времени выдержки при нагреве под закалку малогабаритных изделий из конструкционных сталей. Коэффициент температуропроводности стали значительно превышает коэффициент диффузии. Небольшие размеры заготовок позволяют полагать, что во время прогрева заготовки до заданной температуры температурный градиент по сечению невелик. Следовательно, время выдержки определяется в основном не временем выравнивания температуры по сечению детали (кроме случая крупногабаритных деталей), а временем, необходимым для достаточно полного протекания диффузионных процессов аустенизации [5]. Эта стадия операции термообработки является наиболее длительной и, следовательно, самой энергоемкой, поскольку происходящие во время изотермической выдержки физико-химические и структурные превращения лимитируются самым медленным процессом – твердофазной диффузией. Известно, что на кинетику превращений аустенита, и, следовательно, на продолжительность гомогенизации твердого раствора оказывает влияние величина зерна аустенита. От нее зависят число центров зарождения новой фазы и продолжительность протекания диффузионных процессов. Таким образом, наличие исходной троостосорбитной структуры в изделии дает существенный резерв уменьшения времени выдержки. Данный фактор, как правило, не учитывается при назначении режимов ТО. Ранее совместно

со специалистами Минского автомобильного завода были предложены критерии подбора стальных деталей для обоснованного уменьшения времени выдержки под закалку [5]:

- 1) геометрическая форма детали должна быть близка к простой;
- 2) детали должны быть изготовлены из среднеуглеродистых или низколегированных конструкционных улучшаемых сталей (стали 35, 40, 40Х и др.);
- 3) вид термической обработки: улучшение;
- 4) объем производства: крупносерийное или массовое.

Выполненные оценочные расчеты свидетельствовали об экономической целесообразности предложенных технологических решений. Так, увеличение температуры нагрева для стали 40Х от 860 до 900 °С дает возможность уменьшить время выдержки до 20–40 % с соответствующим снижением расхода природного газа.

Ускорение диффузионных процессов при химико-термической обработке

Как известно, процесс ХТО является гетерогенным, происходящим между веществами, находящимися в различных соприкасающихся фазах. Его традиционно делят на пять основных элементарных стадий [6, 7]. Скорость всего процесса определяется лимитирующей (самой медленной) стадией. Выявление этой стадии и целенаправленное воздействие на нее дает возможность ускорения всего процесса ХТО. Часто лимитирующими стадиями при ХТО сталей являются диффузионные процессы в стали и сорбционные процессы на поверхности.

Повышение температуры цементации низколегированных сталей за счет стабилизации размера аустенитного зерна при ступенчатом нагреве

В настоящее время цементацию подавляющего большинства деталей осуществляют в автоматизированных проходных и камерных агрегатах, обеспечивающих проведение всего цикла химико-термической обработки (ХТО) от нагрева до закалки в контролируемых газовых атмосферах без доступа воздуха при температурах 930–950 °С [8]. Недостатком указанной технологии является большая продолжительность изотермической выдержки в процессе насыщения поверхностных слоев углеродом, что приводит к относительно низкой производительности процесса ХТО, а также к его высокой энергоемкости и себестоимости. В частности, время выдержки конструкционных цементуемых сталей при температуре насыщения 950 °С, необходимое для достижения толщины цементованного слоя $\approx 1,5$ мм, составляет 11–12 ч. Повышение температуры цементации – наиболее действенный способ увеличения производительности при ХТО, повышающий эффективность термического производства и прежде всего уменьшающий расходы энергетических ресурсов. Так, например, увеличение температуры цементации от 950 до 1000 и 1050 °С приводит к уменьшению времени насыщения до глубины слоя 1,2–1,3 мм $\approx$ в 1,6 и 2,3 раза соответственно, что позволяет существенно снизить энергоемкость процесса и повысить его производительность. Современное оборудование дает возможность осуществлять процесс высокотемпературной цементации при 1000–1050 °С в шахтных печах и проходных агрегатах. Вместе с тем высокотемпературная цементация используемых в СНГ и Беларуси стандартных цементуемых сталей при температуре 1000–1050 °С приводит к укрупнению в них зерна и получению некачественной грубой микроструктуры как в науглероженном слое, так и в сердцевине, а также к повышенному содержанию в слое остаточного аустенита.

В частности, результаты проведенных исследований [9] показывают, что наиболее часто используемые в отечественном тракторостроении стали 25ХГТ, 20ХНЗА, 20ХНР, 15ХГН2ТА и др. (ГОСТ 4543-71) неприменимы для высокотемпературной цементации из-за их склонности к росту аустенитного зерна при температурах ≥ 950 °С. Эту проблему в настоящее время можно решить либо путем весьма трудоемкой и дорогостоящей разработки новых отечественных наследственно-мелкозернистых цементуемых сталей, сохраняющих дисперсную структуру после длительных изотермических выдержек при температурах 1000–1050 °С, либо путем совершенствования технологических режимов обработки стандартных цементуемых сталей с целью повышения стабильности их зеренной структуры в процессе высокотемпературной цементации. В основу разработки таких технологий могут быть положены исследования, проведенные в [10], которые позволили установить, что на кинетику укрупнения аустенитного зерна в легированных конструкционных сталях при высокотемпературных выдержках весьма значительное влияние оказывают скорость нагрева сталей в интервале температур фазового $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения, а также исходная структура и состав сталей [10]. Результаты исследований показали, что за счет варьирования скоростью

нагрева конструкционных хромоникелевых цементуемых сталей в температурном диапазоне фазового $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения можно добиться существенного увеличения стабильности зеренной структуры сталей при высокотемпературной выдержке в области температур 1000–1020 °С [11, 12].

Механизм обнаруженного явления стабилизации зеренной структуры сталей заключается в формировании при медленном нагреве в области $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения аустенитных зерен с преимущественно высокоугловой разориентацией и границами зерен, заблокированными адсорбированными примесными атомами [12]. Полученные результаты открывают новые практические возможности для разработки технологических режимов ресурсосберегающей высокотемпературной цементации стандартных сталей, обеспечивающих сохранение в них качественных мелкозернистых структур в процессе насыщения углеродом при высоких температурах 1000–1020 °С. Так, для условий Минского тракторного завода при цементации стали 20ХН3А для получения цементуемого слоя 1,2–1,3 мм при температуре 960 °С необходимо 390 мин, а при температуре 1030 °С – 248 мин. Таким образом, высокотемпературная цементация промышленных марок сталей, выполненная по режиму ступенчатого нагрева при 1020 °С, при сохранении качественной микроструктуры сталей обеспечивает уменьшение времени цементации на 20% по сравнению с цементацией при 960 °С. В условиях МТЗ использование ступенчатого режима нагрева может дать расчетную годовую экономию электроэнергии более 500 000 кВт·ч. Опыт выполненных работ и теоретический анализ дают основания полагать, что разработанные структурные приемы стабилизации размера высокотемпературного аустенитного зерна могут быть использованы также для нагрева под закалку ряда низколегированных улучшаемых сталей, что позволит сократить время высокотемпературной выдержки с экономией энергоресурсов.

Ускорение диффузионных процессов за счет использования нестационарных режимов при ХТО

Термоциклирование при ТО и ХТО – известный технологический прием активации структурно-фазовых превращений [13]. Техничко-экономический потенциал этого направления энергосбережения по-прежнему высок, а возможности далеки до исчерпания. За последние годы выполнен ряд исследований по применению термоциклирования для процессов борирования, нитроцементации и азотирования [14, 15 и др.].

Было установлено, что индукционное термоциклирование конструкционной стали без фазовой перекристаллизации в интервале температур 400–700 °С формирует остаточные термические напряжения, обуславливающие повышение плотности дислокаций, а также развитие начальных стадий рекристаллизации. Это обеспечивает формирование полигональной, термически устойчивой субструктуры и повышение твердости стали. Индукционное термоциклирование конструкционных сталей с полной фазовой перекристаллизацией в интервале температур 600–940 °С приводит к развитию рекристаллизационных процессов различной интенсивности на поверхности и в сердцевине стального образца. Фазовый наклеп не устраняется полностью при нагреве и степень деформации зерен возрастает с каждым циклом нагрева-охлаждения. В результате после четырех и более циклов ТЦО в поверхностном слое протекает собирательная рекристаллизация, которая формирует зерна диаметром 60 мкм, на фоне мелких зерен диаметром 16 мкм. В сердцевине (сталь 20) сохраняется мелкодисперсная структура (диаметр 8–12 мкм) и в ней протекают процессы полигонизации, а также «рекристаллизации на месте», о чем свидетельствует укрупнение кристаллитов с 150 нм (отжиг) до 300 нм (шесть циклов) [16].

Термоциклирование в условиях индукционного нагрева при нитроцементации стали обеспечило не только увеличение толщины диффузионного слоя, но и структурные изменения, обеспечившие повышение износостойкости упрочненного изделия. Это позволило за 200 с сформировать слой толщиной 0,6 мм со структурой легированного мартенсита и с твердостью 9000 МПа. Так, на стали 40Х за 90 с формируется диффузионный слой в 0,9 мм, при этом в сердцевине стали формируется мелкозернистая структура 10–14-го балла [17]. Азотирование с применением термоциклирования в условиях печного нагрева позволяет интенсифицировать диффузию азота, скорость формирования диффузионного слоя, а также повысить свойства диффузионного слоя по сечению и на поверхности стали. Тем самым за равный промежуток времени (8 ч) при термоциклировании формируется на 15–20% большая толщина термодиффузионного слоя [18, 19].

Ускорение термодиффузионного цинкования при диффузионном распаде мартенсита

Одним из эффективных направлений в области получения антикоррозионных покрытий на сталях является способ термодиффузионного цинкования в порошковых насыщающих средах (ТДЦ) [20].

Традиционно ТДЦ производится непосредственно после окончательной термообработки деталей. Если в процессе термической обработки изделия предполагается использовать операции отпуска, то наиболее экономически выгодным решением является совмещение либо замена отпуска процессом термодиффузионного цинкования, что позволяет исключить дополнительные затраты на антикоррозионную обработку изделий, а также сократить количество оборудования и повысить эффективность использования производственных площадей предприятия. Следует отметить, что температурный интервал процессов термодиффузионного цинкования составляет от 350 до 700 °С в зависимости от ряда особых технологических параметров процесса. Такой широкий интервал рабочих температур дает возможность подобрать необходимый режим цинкования с учетом предварительной термической обработки изделий. Проведенные исследования позволили предложить несколько вариантов включения диффузионного цинкования в общий цикл термической обработки стальных изделий. Разработана и внедрена энергосберегающая технология ТДЦ, обеспечивающая совмещение операций среднего отпуска после закалки ТДЦ [21].

При реализации процессов ТДЦ в общем цикле термической обработки существенное влияние оказывает исходная структура стали после предварительной ТО. Выполненными исследованиями установлено, что наличие мартенситной структуры закалки углеродистой стали существенно изменяет кинетику и состав термодиффузионного цинкового слоя [22]. С учетом температурного интервала протекания процессов ТДЦ (380–420 °С) формирование диффузионного цинкового слоя на изделиях после закалки на мартенсит происходит в условиях распада пересыщенного твердого раствора (мартенсита). При цинковании сталей после закалки формирование диффузионного слоя происходит на поверхности с большой степенью дефектности в условиях значительных структурных напряжений. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют об ускорении формирования термодиффузионного цинкового слоя в период структурно-фазовой перекристаллизации. Характерно, что ускорение роста диффузионного слоя имеет место только на этапе распада мартенсита. Далее кинетика роста слоя у сталей с перлитной и мартенситной основой близки. Но равномерность цинкового слоя на закаленной стали выше.

Активация поверхностных процессов

Как известно, лимитирующими факторами ряда процессов ХТО сталей являются сорбционные процессы на поверхности и твердофазная диффузия в поверхностном слое. Активация этих процессов в ряде случаев позволяет ускорить формирование диффузионного слоя, тем самым обеспечить снижение времени обработки.

Литературный анализ и собственные исследования свидетельствуют, что пластическая деформация, в том числе поверхностная, создают дополнительные дефекты кристаллического строения, которые положительно влияют на диффузию ряда легирующих элементов в стали. Однако необходимо учитывать характер взаимодействия легирующего элемента в стали (твердые растворы внедрения или замещения), а также соотношение температур ХТО и рекристаллизации стали. Предпочтение следует отдавать процессам ХТО, имеющим сопоставимые с температурой рекристаллизации или более низкие температуры. В этом случае частично и полностью сохраняется деформационный наклеп поверхности. Сохранение первичных стадий процессов рекристаллизации (возврат, полигонизация) облегчает диффузию. Так, например, поверхностная пластическая деформация стали 40ХМФА, проведенная перед низкотемпературным ионно-плазменным азотированием, способствует неаддитивному повышению микротвердости поверхностного слоя на $\Delta HV_{0,05} = 90$. При этом отмечено повышение концентрации азота в диффузионном слое.

Регламентированное окисление стальной поверхности перед борированием, цементацией или азотированием в значительной степени влияет на процесс ХТО. Результаты, полученные при изучении влияния предварительного оксидирования на цементацию и борирование, свидетельствуют о том, что на предварительно окисленных образцах процесс насыщения углеродом, бором проходил более активно. Увеличение коэффициентов диффузии атомов углерода, бора в аустените в этом случае маловероятно. Интенсификация процесса вызвана тем, что наличие тонкой (1,0–1,5 мкм) оксидной пленки на насыщаемых поверхностях вызывает изменение механизма сорбционных процессов, а также изменение геометрических, химических параметров поверхностного слоя. В этом случае имеют место активные хемосорбционные процессы [23]. В результате химических реакций оксиды на поверхности восстанавливаются, образуя атомно-чистую поверхность с большей удельной площадью и высокой сорбционной способностью. Обнаружен экстремальный характер влияния толщины оксидной пленки на интенсификацию последующей ХТО. При ХТО образцов с относительно тонкими оксидными пленками (толщина пленки 1,0–1,5 мкм) происходит полное восстановление оксидов и адсорбированные углерод, бор

активно диффундируют в аустенитную основу. При увеличении толщины оксидной пленки отмечено активное сажеобразование. Таким образом, предварительное окисление стальных образцов (500–600 °С, 30–45 мин) перед ХТО позволяет интенсифицировать процесс насыщения элементами, имеющими большее сродство к кислороду, чем основной металл. Интенсификация процесса ХТО в этом случае обусловлена активным протеканием хемосорбционных процессов на поверхности и увеличением удельной площади этой поверхности. Увеличение толщины оксидной пленки более 6 мкм ведет к формированию барьерного слоя, снижающего скорость ХТО.

Выводы

Энергосбережение в процессах термической и химико-термической обработки по-прежнему остается актуальным направлением повышения конкурентоспособности продукции. Практиковавшийся ранее путь радикального обновления парка термического оборудования в настоящее время трудно реализуем. Наличие современного оборудования не является гарантией энергосбережения при термическом переделе. Важное значение имеет научно обоснованная и технико-экономически оправданная активизация структурно-фазовых превращений в сталях, основанная на ускорении диффузионных процессов в твердой фазе. Энергосберегающая оптимизация режимов термической обработки и активация сорбционных процессов при химико-термической обработке имеют существенный потенциал энергосбережения.

Обобщен ряд технологически эффективных путей энергосбережения за счет ускорения диффузионных процессов:

- регламентированный, научно обоснованный перегрев улучшаемых низколегированных сталей под закалку;
- повышение температуры цементации низколегированных сталей за счет стабилизации размера аустенитного зерна при ступенчатом нагреве;
- ускорение диффузионных процессов за счет использования нестационарных режимов при ХТО;
- ускорение термодиффузионного цинкования при диффузионном распаде мартенсита;
- активация сорбционных процессов при ХТО за счет поверхностной пластической деформации и регламентированного окисления поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гурченко, П. С. Пути переоснащения энергоемких производств на ОАО «МАЗ» в 2008–2009 годах и перспективы развития на 2010–2012 годы / П. С. Гурченко // Техника, экономика, организация. – 2009 г. – № 4. – С. 12–14.
2. Гринчук, П. С. Энергоэффективность и качество при печной термообработке металла / П. С. Гринчук // Литье и металлургия. – 2018. – № 4. – С. 5–13.
3. Константинов, В. М. Развитие научно-педагогической школы кафедры «Материаловедение в машиностроении» / В. М. Константинов // Литье и металлургия. – 2020. – № 4. – С. 36–40.
4. Константинов, В. М. Исследование особенностей формирования структуры конструкционных сталей с позиций энергосбережения при термической обработке / В. М. Константинов, Э. Д. Щербаков, Т. Н. Синиченко // Литье и металлургия. – 2010. – № 4. – С. 171–175.
5. К проблеме энергосбережения и повышения качества термической обработки / В. М. Константинов [и др.] // Металлургия: республ. межвед. сб. науч. тр. – Минск: Белорусская наука, 2008. – Вып. 31. – С. 37–42.
6. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: Справ. / Г. В. Борисенок [и др.]. – М.: Металлургия, 1981. – 424 с.
7. Интенсификация процессов химико-термической обработки сталей / Л. Г. Петрова [и др.]. – М.: МАДИ, 2019. – 160 с.
8. Зинченко, В. М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки / В. М. Зинченко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 303 с.
9. Валько, А. Л. Влияние высокотемпературной цементации на величину зерна конструкционных сталей / А. Л. Валько, С. П. Руденко, А. Н. Чичин // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. 2014. – Вып. 3. – С. 343–346.
10. Кукареко, В. А. Закономерности роста аустенитного зерна в стали 18ХНВА / В. А. Кукареко // Металловедение и термическая обработка. – 1981. – № 9. – С. 15–17.
11. Математическое моделирование и механизм укрупнения аустенитного зерна при высокотемпературном нагреве легированных конструкционных сталей / В. А. Кукареко [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2019. – № 3 (48). – С. 58–68.
12. Кукареко, В. А. Строение границ зерен и механизм стабилизации зеренной структуры сталей методом ступенчатого нагрева до температур аустенизации / В. А. Кукареко, А. Н. Григорчик, А. Н. Чичин // Механика машин, механизмов и материалов. – 2020. – № 1 (50). – С. 45–54.
13. Биронт, В. С. Применение ультразвука при термической обработке металлов / В. С. Биронт. – М.: Металлургия, 1978. – С. 168.
14. Кукин, С. Ф. Изучение влияния предварительной ультразвуковой обработки на результаты нормализации стали 40Х / С. Ф. Кукин, Т. Н. Синиченко // Металлургия : республ. межвед. сб. науч. тр. – Минск: БНТУ. – 2011. – Вып. 33. – С. 54–65.

15. **Константинов, В.М.** Анализ влияния ультразвуковой обработки на изменение структуры и свойств улучшаемой стали / В.М. Константинов, Т.Н. Стрижевская // Актуальные проблемы прочности: материалы МНТК. Витебск, 23–27 мая 2022 г; под ред. В.В. Рубаника. – Минск: УП «ИВЦ Минфина», 2022. – С. 357–359.
16. **Константинов, В.М.** Упрочнение быстроизнашиваемых деталей почвообрабатывающих плугов нитроцементацией с локальным циклическим индукционным нагревом / В.М. Константинов, Г.А. Ткаченко // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – № 2. – С. 44–50.
17. Specific features of the structure formation of doctectoid structural steels at different regimes of thermocyclic treatme / V.M. Konstantinov [et al.] // Technical science and innovation. – 2022. – № 1 (11). – P. 234–240.
18. Structure of commercial titanium subjected to low-temperature ion nitriding / V.M. Konstantinov [et al.] // Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials. – 2022. – № 1. – P. 48–55.
19. Применение циклического нагрева при азотировании легированных инструментальных сталей / Г.А. Ткаченко [и др.] // Металлургия: респ. межвед. сб. научн. тр. – Минск: БНТУ, 2019. – Вып. 40. – С. 179–187.
20. **Константинов, В.М.** Антикоррозионные цинковые покрытия на стальных изделиях: перспективы термодиффузионных покрытий / В.М. Константинов, Н.И. Иваницкий, Л.А. Астрейко // Литье и металлургия. – 2013. – № 4. – С. 107–110.
21. **Булойчик, И.А.** Термодиффузионное цинкование улучшаемых и пружинных сталей / И.А. Булойчик // Литье и металлургия. – 2013. – № 4. – С. 121–124.
22. **Константинов, В.М.** Исследование структурных и физико-химических факторов ускорения диффузионных процессов при формировании цинксодержащих слоев на конструкционных сталях / В.М. Константинов, И.А. Булойчик // Металлургия: республ. межвед. сб. науч. тр. – Минск: БНТУ, 2019. – Вып.40. – С. 168–178.
23. Перспективные материалы и технологии / А.А. Антанович [и др.]; под ред. В.В. Рубаника. – Минск: ИВЦ Минфина, 2023. – 403 с.

REFERENCES

1. **Gurchenko P.S.** Puti pereosnashheniya jenergoemkih proizvodstv na OAO “MAZ” v 2008–2009 godah i perspektivy razvitiya na 2010–2012 gody [Ways to re-equip energy-intensive production facilities at OJSC MAZ in 2008–2009 and development prospects for 2010–2012.]. *Tehnika, jekonomika, organizacija = Technology, economics, organization*, 2009, no. 4, pp. 12–14.
2. **Grinchuk P.S.** Jenergojeffektivnost’ i kachestvo pri pechnoj termoobrabotke metalla [Energy efficiency and quality in furnace heat treatment of metal]. *Lit’e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2018, no. 4, pp. 5–13.
3. **Konstantinov V.M.** Razvitie nauchno-pedagogicheskoy shkoly kafedry «Materialovedenie v mashinostroenii» [Development of the scientific and pedagogical school of the department “Materials Science in Mechanical Engineering”]. *Lit’e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 4, pp. 36–40.
4. **Konstantinov V.M., Shherbakov Je.D., Sinichenko T.N.** Issledovanie osobennostej formirovaniya struktury konstrukcionnyh stalej s pozicij jenergosberezhenija pri termicheskoy obrabotke [Study of the peculiarities of the formation of the structure of structural steels from the standpoint of energy saving during heat treatment]. *Lit’e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2010, no. 4, pp. 171–175.
5. **Konstantinov V.M., Gurchenko P.S., Stefanovich V.A., Strizhevskaja T.N.** K probleme jenergosberezhenija i povyschenija kachestva termicheskoy obrabotki [On the problem of energy saving and improving the quality of heat treatment]. *Metallurgija: respublikanskij mezhdvedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific works*, Minsk, Belorusskaja nauka Publ., 2008, vyp. 31, pp. 37–42.
6. **Borisenok G.V., Vasil’ev L.A., Voroshnin L.G.** Himiko-termicheskaja obrabotka metallov i splavov [Chemical-thermal treatment of metals and alloys]. Moscow, Metallurgija Publ., 1981, 424 p.
7. **Petrova L.G., Aleksandrov V.A., Demin P.E., Sergeeva A.S.** Intensifikacija processov himiko-termicheskoy obrabotki stalej [Intensification of chemical-thermal treatment processes of steels]. Moscow, MADI Publ., 2019, 160 p.
8. **Zinchenko V.M.** Inzhenerija poverhnosti zubchatyh kolez metodami himiko-termicheskoy obrabotki [Engineering of gear surfaces using chemical-thermal treatment methods]. Moscow, Izd-vo MGTU im. N. Je. Baumana Publ., 2001, 303 p.
9. **Val’ko A.L., Rudenko S.P., Chichin A.N.** Vlijanie vysokotemperaturnoj cementacii na velichinu zerna konstrukcionnyh stalej [The influence of high-temperature carburization on the grain size of structural steels]. *Aktual’nye voprosy mashinovedenija = Current issues in mechanical engineering*, 2014, vyp. 3, pp. 343–346.
10. **Kukareko V.A.** Zakonomernosti rosta austenitnogo zerna v stali 18HNVA [Patterns of growth of austenitic grains in steel 18XHBA]. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka = Metallurgy and Heat Treatment*, 1981, no. 9, pp. 15–17.
11. **Kukareko V.A., Gacuro V.M., Grigorchik A.N., Chichin A.N.** Matematicheskoe modelirovanie i mehanizm ukрупnenija austenitnogo zerna pri vysokotemperaturnom nagreve legirovannyh konstrukcionnyh stalej [Mathematical modeling and mechanism of coarsening of austenite grains during high-temperature heating of alloy structural steels]. *Mehanika mashin, mehanizmov i materialov = Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2019, no. 3, pp. 58–68.
12. **Kukareko V.A., Grigorchik A.N., Chichin A.N.** Stroenie granic zeren i mehanizm stabilizacii zerennoj struktury stalej metodom stupenchatogo nagreva do temperatur austenizacii [The structure of grain boundaries and the mechanism of stabilization of the grain structure of steels by the method of stepwise heating to austenitization temperatures]. *Mehanika mashin, mehanizmov i materialov = Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2020, no. 1(50), pp. 45–54.
13. **Biront V.S.** Primenenie ul’trazvuka pri termicheskoy obrabotke metallov [Application of ultrasound in heat treatment of metals]. Moscow, Metallurgija Publ., 1978, 168 p.
14. **Kukin S.F., Sinichenko T.N.** Izuchenie vlijanija predvaritel’noj ul’trazvukovoj obrabotki na rezul’taty normalizacii stali 40H [Study of the influence of preliminary ultrasonic treatment on the results of normalization of 40X steel]. *Metallurgija: respublikanskij mezhdvedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific works*, Minsk, BNTU Publ., 2011, vyp. 33, pp. 54–65.
15. **Konstantinov V.M., Strizhevskaja T.N.** Analiz vlijanija ul’trazvukovoj obrabotki na izmenenie struktury i svojstv uluchshae-moj stali [Analysis of the influence of ultrasonic treatment on changes in the structure and properties of steel being improved]. *Aktual’nye problemy prochnosti = Current problems of strength*, Minsk, UP IVC Minfina Publ., 2022, pp. 357–359.

16. **Konstantinov V.M., Tkachenko G.A.** Uprochnenie bystroiznashivaemyh detalej pochvoobrabatyvajushhih plugov nitrocementaciej s lokal'nym ciklicheskim indukcionnym nagrevom [Strengthening of wear parts of soil-cultivating plows by nitrocarburization with local cyclic induction heating]. *Uprochnjajushhie tehnologii i pokrytija = Strengthening technologies and coatings*, 2011, no. 2, pp. 44–50.
17. **Konstantinov V.M., Berdiev D.M., Yusupov A.A., Tkachenko G.A.** Specific features of the structure formation of doeutectoid structural steels at different regimes of thermocyclic treatme. *Technical science and innovation*, 2022, no.1 (11), pp. 234–240.
18. **Kukareko V.A., Konstantinov V.M., Vereshchak N.A., Grigorchik A.N.** Structure of commercial titanium subjected to low-temperature ion nitriding. *Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*, 2022, no. 1, pp. 48–55.
19. **Tkachenko G.A., Koval'chuk A.V., Vereshhak N.A., Paceko E.K.** Primenenie ciklicheskogo nagreva pri azotirovanii legirovannyh instrumental'nyh stalej [Application of cyclic heating during nitriding of alloy tool steels]. *Metallurgija: respublikanskij mezhdomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific works*. Minsk, BNTU Publ., 2019, vyp. 40, pp. 179–187.
20. **Konstantinov V.M., Ivanickij N.I., Astrejko L.A.** Antikorroziionnye cinkovye pokrytija na stal'nyh izdelijah: perspektivy termodiffuzionnyh pokrytij [Anti-corrosion zinc coatings on steel products: prospects for thermal diffusion coatings]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2013, no. 4, pp. 107–110.
21. **Bulojchik I.A.** Termodiffuzionnoe cinkovanie uluchshaemyh i pruzhinnyh stalej [Thermal diffusion galvanizing of tempered and spring steels]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2013, no. 4, pp. 121–124.
22. **Konstantinov V.M., Bulojchik I.A.** Issledovanie strukturnyh i fiziko-himicheskikh faktorov uskorenija diffuzionnyh processov pri formirovanii cinksoderzhashhih sloev na konstrukcionnyh staljah. [Study of structural and physicochemical factors accelerating diffusion processes during the formation of zinc-containing layers on structural steels]. *Metallurgija: respublikansky mezvedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific works*. Minsk, BNTU Publ., 2019, vyp. 40, pp. 168–178.
23. **Antanovich A.A. et al.** *Perspektivnye materialy i tehnologii* [Advanced materials and technologies]. Minsk, IVC Minfina Publ., 2023, 403 p.