



The influence of strain aging on characteristics of different steel articles is shown.

Э. Д. ЩЕРБАКОВ, В. П. ЛАПИН, БНТУ, О. Р. ЭССЕНСОН, СЗАО «БЕЛТЭН»

УДК 621.533

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО СТАРЕНИЯ НА СВОЙСТВА РАЗЛИЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СТАЛИ

Проблема прочности и пластичности является одной из основных проблем современной науки о металлах. Требования к материалам постоянно растут. Появляются новые требования, которым должна соответствовать современная продукция. Достижения науки вносят свои коррективы. Изменение в одном звене технологической цепочки неизменно ведет к изменению в других звеньях. Оптимальный результат при производстве любой продукции может быть достигнут лишь при условии учета этих новых данных, требований и технологий.

Одним из явлений, в значительной мере определяющих уровень структурно-чувствительных свойств, в сталях и сплавах цветных металлов является деформационное старение.

В конце 40-х – начале 50-х годов XX в. появились работы Коттрелла, описывающие механизм деформационного старения стали как направленную диффузию атомов азота и углерода под действием упругих напряжений из нормальных позиций внедрения в пересыщенном твердом растворе к дислокациям с образованием у последних скоплений (атмосфер) этих атомов, блокирующих дислокации. В атмосфере Коттрелла атомы примеси привязаны к дислокации силами упругого взаимодействия. Скользящая дислокация стремится увлечь за собой атмосферу Коттрелла, которая может перемещаться только диффузионным путем. Поэтому она способна перемещаться вместе с дислокацией лишь при достаточно высоких температурах и очень малых скоростях скольжения дислокации. Иначе происходит торможение дислокаций. Такое закрепление дислокаций атмосферами Коттрелла вносит большой вклад в изменение механических и технологических свойств металла при наличии в нем примесей и малых добавок [1].

Деформационным старением принято называть изменение свойств металла, происходящее во

времени после холодной или «теплой» пластической деформации. Наиболее важными следствиями деформационного старения стали являются эффекты упрочнения и охрупчивания. Если указанные эффекты наблюдаются в основном при вылеживании после деформации, то такое старение называют статическим, а если в течение самой деформации – динамическим.

В 1949 г. на основе развития дислокационных представлений о строении реальных металлов Коттрелл и Билби сформулировали основные первоначальные положения теории деформационного старения [2], которые получили в дальнейшем развитие в его работах [3, 4].

Теория деформационного старения в общем виде исходит из двух основных положений, многократно подтвержденных практикой [5].

Изменение свойств стали, характерное для деформационного старения, происходит только в том случае, если:

1) в металл деформацией (или другим способом, например, закалкой из аустенитной области) введено определенное количество «свежих» дислокаций;

2) концентрация примесных атомов, которые могут эффективно взаимодействовать с этими дислокациями, превышает 10^{-4} масс. %.

Главным практически важным результатом старения является изменение механических свойств материала. Есть множество примеров использования деформационного старения в качестве упрочняющей термической обработки. Так, его используют при изготовлении деталей из алюминиевых, медных, магниевых, титановых и некоторых других цветных сплавов. Закалкой фиксируют пересыщенный твердый раствор. В закаленном состоянии эти сплавы пластичны и легко деформируются. Заготовки подвергают пластической деформации.

ции и последующему естественному или искусственному старению, в результате чего выделяются стабильные и метастабильные фазы, появляются новые дислокации. Увеличение количества дислокаций и их закрепление приводит к значительному повышению прочности заготовок.

Явление деформационного старения также нашло широкое промышленное применение при производстве упругих элементов (пружин и рессор). Для изготовления пружин и рессор используют предварительно термически обработанную (патентированную или нормализованную) проволоку, ленту или листовую сталь. Полученная при этом структура тонкопластинчатого перлита позволяет выполнить холодную деформацию с высокими степенями обжатия (волочение или холодная прокатка). Сталь существенно упрочняется, сохраняя пластичность и вязкость, достаточную для навивки пружин в холодном состоянии. В результате дополнительного наклепа при холодной навивке пружин и гибке листовых заготовок рессор в металле образуются «свежие» дислокации, обладающие высокой подвижностью, которые при последующем дорекристаллизационном отжиге закрепляются имеющимися в стали атомами внедрения (углерода и азота). В результате повышаются предел упругости, релаксационная стойкость, усталостная прочность, снижаются остаточные напряжения и остаточная деформация пружин при нагружении, стабилизируется форма пружин и их силовые характеристики. Указанные изменения свойств А. Г. Рахштадт связывает с изменением тонкой структуры, образованием сегрегации из атомов углерода на дислокациях и дисперсных частиц карбидов (деформационным старением) [5].

С другой стороны, деформационное старение во многих случаях приводит к нежелательным последствиям, таким, как снижение ударной вязкости и повышение порога хладноломкости, ухудшение штампуемости, уменьшение величины номинального разрушающего напряжения и др.

Несмотря на одинаковое направление изменения свойств стали при старении, в зависимости от способа производства и назначения стальных изделий изменение тех или иных механических свойств может в каждом отдельном случае приобретать особую важность. При этом сама возможность протекания деформационного старения, как правило, обусловлена либо технологической деформацией, либо деформацией при эксплуатации.

Например, для холоднокатаных листа и жести, подвергаемых дрессировке после рекристаллизационного отжига, основное значение имеет изменение свойств, фиксируемых при растяжении, осо-

бенно величина зуба текучести и длина площадки текучести, а также изменение технологических свойств – штампуемости, для проволоки, подвергаемой холодной смотке после отжига на термоагрегатах, – изменение относительного удлинения и числа перегибов. Для стержневой арматуры, особенно для предварительно напряженной, основное значение имеет также изменение относительного удлинения (в том числе равномерного), для толстого листа и профильного проката, подвергаемых холодной резке и правке, идущих на изготовление клепаных и сварных конструкций (что связано с возникновением дополнительных напряжений и деформаций), – изменение склонности к хрупкому разрушению, контролируемое по изменению ударной вязкости, температуры хладноломкости (t_{50}), номинального разрушающего напряжения, равномерного удлинения. Увеличение размеров конструкций и превращение их в монолит (благодаря сварке) делают особо важным учет опасности хрупкого разрушения под влиянием, в частности, деформационного старения [5]. Многие катастрофы, вызванные ухудшением климатических условий (ураганами т. д.) и повлекшие за собой человеческие жертвы, связаны с неверным выбором материала для изготовления металлоконструкций (без учета деформационного старения). Существующие строительные нормы и правила (СНиП) часто не учитывают явление деформационного старения.

Особую значимость это явление приобретает в связи с тем, что оно характерно для низко- и среднеуглеродистой стали обыкновенного качества, объем производства которой составляет до 2/3 от общего производства стали. Эти стали загрязнены, помимо углерода и азота, другими вредными примесями (особенно фосфором и серой), что приводит к повышению температуры перехода в хрупкое состояние.

Холоднокатаный прокат из низкоуглеродистых сталей применяется (в том числе) для изготовления изделий глубокой вытяжкой (например, кузовов автомобилей), поэтому основным показателем пригодности стали в данном случае является штампуемость – способность металла изменять свою форму без нарушения сплошности. Она зависит от качества и физического состояния металла, а именно химического состава, механических свойств (прочности, пластичности, анизотропии), структуры, склонности металла к старению, микрогеометрии и качества поверхности листового проката, наличия внешних и внутренних дефектов и др. При сложной штамповке склонность к деформационному старению нежелательна, поэтому стремятся использовать стали, менее склонные

к старению, – с пониженным содержанием свободных атомов внедрения (например, сталь 08Ю, выплавляемую на НЛМК, в которой $\leq 0,04\%C$, $\leq 0,008\%N$, $\leq 0,01\%P$).

Следует отметить, что изменение механических свойств при деформационном старении низкоуглеродистой стали не всегда является отрицательным. В определенных условиях возможно положительное использование эффекта упрочнения при этом процессе для повышения общего уровня прочности, усталостной прочности, сопротивления ползучести, жесткости, продольной устойчивости некоторых изделий, например, гнутых профилей тонкого сечения и т. д. С этой точки зрения деформационное старение можно рассматривать как один из видов термомеханической (механико-термической) обработки для низкоуглеродистых сталей [5]. Например, упрочнение кузовов автомобилей из сталей с пониженным содержанием атомов углерода и азота (современной стали 08Ю и даже ультранизкоуглеродистой ULC-стали (Ultra-Low-Carbon Steel)) происходит за счет ВН-эффекта (Bake Hardening effect – эффект упрочнения при сушке): Он состоит в том, что эти стали обладают способностью упрочняться в процессе сушки (нагрева) за счет наличия некоторого количества свободного углерода в отожженной стали.

Механизм и кинетика деформационного старения низкоуглеродистых холоднокатаных сталей, влияние на него различных факторов, в том числе технологических параметров производства листа, рассмотрены в ряде работ [6-8].

Склонность к деформационному старению можно уменьшить, связав свободный азот нитридообразующими элементами: алюминием, ванадием, титаном и др. Промышленное применение получила нестареющая сталь, легированная алюминием, марки 08Ю. Причем, чтобы весь азот был связан алюминием, необходимо определенное соотношение $A1/N$, температуры и времени отжига, чтобы прошло полное выделение нитридов алюминия. Скорость выделения нитрида зависит от температуры. При $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ она максимальна. Для полного связывания азота достаточно 10 мин [9].

Второе условие предотвращения склонности стали к старению – образование, рост и коагуляция карбидов, которые являются меньшими препятствиями для движения дислокаций, чем облака Коттрелла. В результате закрепление дислокаций уменьшается, что вызывает снижение значения предела текучести, уменьшение площадки текучести и повышение технологической пластичности.

При отжиге в колпаковых печах выделение нитридов и карбидов успевает полностью пройти.

Поэтому при достаточном содержании алюминия сталь, отожженная в колпаковых печах, не склонна к деформационному старению.

Проведение отжига в агрегатах непрерывного отжига (скоростной нагрев и быстрое охлаждение) приводит к тому, что α -твердый раствор пересыщен атомами внедрения (углерода и азота), поскольку карбиды и нитриды не успевают выделиться, что приводит к последующему изменению свойств металла при вылеживании, когда процесс протекает медленно, и на дальнейших переделах, а также при повышенных температурах. Для получения требуемых механических свойств проката, подвергнутого непрерывному отжигу, необходима дополнительная операция – перестаривание (кратковременный нагрев до $\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$), вызывающая выделение карбидов, нитридов и карбонитридов из твердого раствора. Коагуляция карбидов и нитридов при перестаривании приводит к «освобождению» дислокаций, увеличению количества систем скольжения, т. е. к повышению пластичности. После отжига холоднокатаная сталь характеризуется наличием зуба и площадки текучести на кривой растяжения, а также появлением линий Людерса–Чернова при штамповке, что исключает ее применение без дополнительной обработки. Такой обработкой является дрессировка (обжатие $0,8\text{--}1,5\%$), в результате которой на кривой растяжения уменьшается или вовсе исчезает площадка текучести. Это можно объяснить с позиции теории дислокаций появлением «свежих», незакрепленных дислокаций. Иногда с целью повышения прочности некоторых деталей автомобиля (бамперов и др.) тонколистовую сталь дрессируют с обжатием до 2% [6].

По ГОСТ 9045-93 прокат тонколистовой холоднокатаный из низкоуглеродистой качественной стали для холодной штамповки изготавливают в термически обработанном и дрессированном состоянии. По согласованию изготовителя с потребителем прокат изготавливают и в недресированном состоянии, при этом допускаются полосы – линии скольжения, а показатели по пределу текучести, глубине сферической лунки, относительному удлинению не нормируются.

Величина относительного удлинения и глубина сферической лунки проката категории вытяжки ВГ (из сталей 08пс и 08кп), изготавливаемого в дрессированном состоянии, гарантируется изготовителем в течение 10 сут с момента отгрузки. Для проката категорий ВОСВ, ВОСВ-Т, ОСВ, СВ (из стали 08Ю) такого ограничения в ГОСТ нет (гарантийный срок не указан).

По ГОСТ 9045-93 допускается изготовление проката категории ВГ из стали 08Ю. Склонность

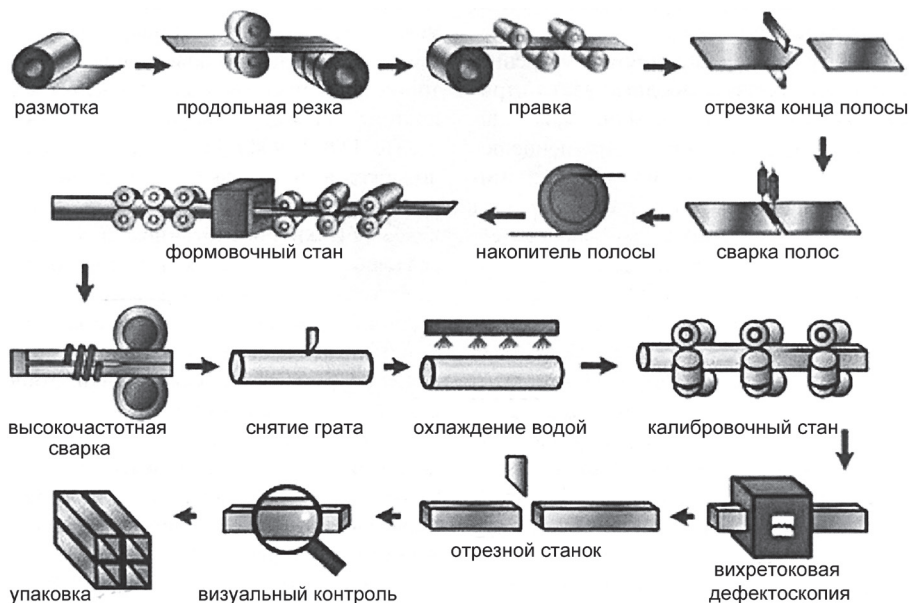


Рис. 1. Технологическая схема изготовления тонкостенных электросварных труб

стали 08Ю к деформационному старению может быть вызвана неполным выделением карбидов и нитридов из пересыщенного твердого раствора (при отжиге в АНО без операции перестаривания). На некоторых металлургических комбинатах (НЛМК и др.) есть агрегаты, в которых нет камеры перестаривания. Именно на них получают сталь 08Ю категории вытяжки ВГ, склонную к деформационному старению. К сожалению, покупая сталь у посредников, потребитель часто не знает, какому отжигу подвергалась сталь – в АНО или колпаковых печах, с перестариванием или без. Тогда в некоторых случаях возможно деформационное старение заготовок из стали 08Ю категории вытяжки ВГ после внесения «свежих» дислокаций при деформации в ходе последующих переделов.

Другими словами, стали 08пс и 08кп всегда склонны к деформационному старению, сталь 08Ю категорий вытяжки ВОСВ, ВОСВ-Т, ОСВ, СВ к старению не склонна, а сталь 08Ю категории вытяжки ВГ может быть, а может и не быть склонна к старению. И это необходимо контролировать при входном контроле. Если деформационное старение не допустимо, следует отказаться от использования проката из сталей категории вытяжки ВГ (марок 08пс, 08кп, 08Ю). Использование сталей этой категории в наиболее ответственных изделиях может привести к снижению технологической пластичности в процессе изготовления изделий или конструктивной прочности и надежности при эксплуатации.

Изготовление тонкостенных электросварных труб – частный случай использования холоднокатаного стального проката. Технологическая схема их изготовления показана на рис. 1.

В ходе формовки штрипса в трубную заготовку (рис. 2) металл деформируется. Причем деформация по сечению металла неравномерна. Она зависит от типоразмера трубы (диаметра и толщины стенки) и технологии ее производства.

Расчеты показали, что поверхностные слои труб испытывают критические степени деформации и операция рекристаллизационного отжига для труб нежелательна и даже недопустима, поскольку приводит к полигонизационной перестройке структуры поверхностных слоев труб. Кроме того, рекристаллизационный отжиг при температуре 650–700 °С не исправляет структуру сварного шва и околошовной зоны.

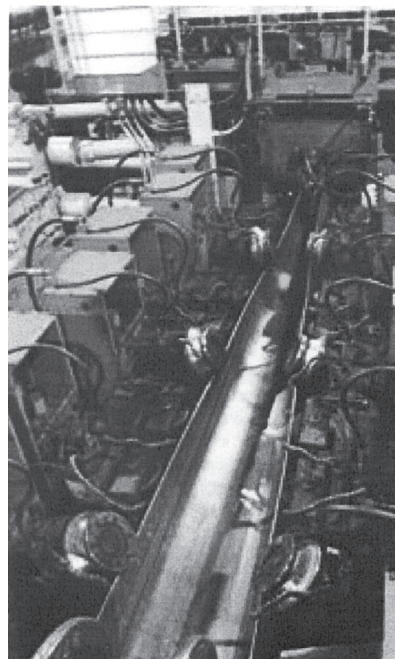


Рис. 2. Формовка трубной заготовки



Рис. 3. Брак при штамповке горелок в результате предварительного дорекристаллизационного отжига (СП ОАО «Брестгазоаппарат», г. Брест)

При холодной штамповке партии горелок газовой плиты «Гефест» СП ОАО «Брестгазоаппарат» (размер партии – 8 т) брак составил более 90% (рис. 3). Как видно из рисунка, трещина проходит в околосшовной зоне трубы, структура которой при рекристаллизационном отжиге не была исправлена. Исследования показали, что трубы, не подвергнутые рекристаллизационному отжигу, обладают достаточно высокой пластичностью, которая резко снижается при рекристаллизационном отжиге. Однако отказаться от операции отжига не удалось в связи с тем, что в не отожженном состоянии пластичность несколько не достаточна и вызывает брак при штамповке 2–3%. Исследования показали, что дорекристаллизационный отжиг позволяет обеспечить холодную штамповку горелок без брака. Дорекристаллизационный отжиг был внедрен на производстве.

Труба может потерять пластичность не только в результате неправильно выбранного режима отжига, но и в результате деформационного старения, спровоцированного вылеживанием труб в условиях жаркого лета и/или мойкой в горячей воде.

Так, при нагреве на 70 °С (в ходе мойки) трубы диаметром 16 мм из стали 08Ю ее относительное удлинение упало на 4%, что привело к незначительному браку в ходе гибки заготовок. При проведении исследований той же партии трубы через месяц (т. е. после вылеживания в летний период) было обнаружено падение относительного удлинения (по сравнению с начальным уровнем) на 8–9% (рис. 4).

Поэтому если нагрев или длительное вылеживание тонколистового проката или тонкостенных электросварных труб, изготовленных из него, перед штамповкой

или гибкой с большими степенями деформации неизбежны, необходимо более внимательно относиться к склонности стали к старению.

Полученные результаты исследования привели к внедрению на СЗАО «БелТЭН», производящем тонкостенные электросварные трубы, в ходе входного контроля проката и окончательного контроля готовой трубы испытаний на склонность к деформационному старению. Контролируемыми параметрами являются относительное удлинение и предел текучести. Снижение этих характеристик свидетельствует о склонности металла данной плавки к деформационному старению.

Листовая малоуглеродистая сталь 08Ю должна иметь высокий комплекс свойств в состоянии поставки, обладать достаточной пластичностью и не давать линий сдвига при штамповке. Эти показатели установлены в ГОСТ 9045-93. В последние годы было выявлено, что сталь должна иметь и ряд других показателей, не регламентированных упомянутым стандартом. Кроме того, в автомобилестроении уже теперь предъявляются более высокие требования к пластичности, штампуемости, качеству поверхности. Выпуск сталей, соответствующих современным требованиям, уже освоен на ряде крупных металлургических комбинатов России и Украины. Металлургические комбинаты разрабатывают собственные нормативные документы (ТУ, ТП и т. д.), регламентирующие выпуск продукции. Широкий выбор холоднокатаного проката с различными механическими характеристиками позволяет подобрать оптимальный материал для различных изделий.

Следует отметить также, что НТД на трубы никак не отражает современных требований. Ис-

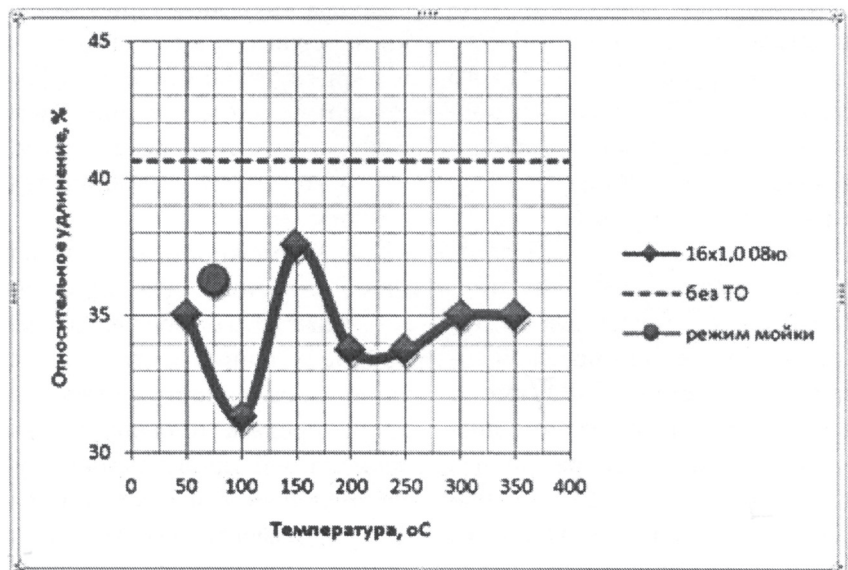


Рис. 4. Изменение относительного удлинения трубы в результате деформационного старения

пользование новых материалов и технологий уже сейчас позволяет получать трубы более высокого качества, чем это заложено в ГОСТ. Новый уровень механических и технологических свойств труб влияет и на технологию дальнейшего передела, что тоже нигде не учтено.

Так, по ГОСТ 10704-91 трубы с термообработкой основного металла должны иметь пластичность не менее 30%. Трубы, изготовленные по этому ГОСТ на СЗАО «БелТЭН» без термической обработки (калиброванные) из стали 08Ю, имеют пластичность 48–50%. Увеличение наружного диаметра при раздаче труб составляет для различных типоразмеров (калиброванных) труб 35–45%, при требуемых – 12%. Это исключает в большинстве случаев необходимость проведения отжига перед штамповкой или гибкой.

Испытание труб из современных сталей 08Ю и 08пс на раздачу до разрыва показало, что разрыв не приходится на сварной шов и околошовную зону, а проходит по телу основного металла. Это можно объяснить только высокой чистотой современной стали 08Ю по фосфору. Анализ данных сертификатов металлургических заводов свидетельствует о том, что содержание фосфора зачистую составляет тысячные доли процента. Такая сталь не нуждается в исправлении структуры сварного шва и околошовной зоны, т. е. в операциях нормализации или отжига с нагревом выше критической точки A_3 нет необходимости.

Выводы

1. Деформационное старение имеет огромное практическое значение при производстве полуфа-

брикатов и изделий из низко- и среднеуглеродистых сталей обыкновенного качества и качественных.

2. Показано, что явление деформационного старения широко применяется в качестве упрочняющей обработки при изготовлении упругих элементов, кузовов легковых автомобилей и других изделий. Тогда стремятся использовать такие стали или сплавы и режимы старения, которые позволяют достичь упрочнения в максимальной степени; при производстве кузовов автомобилей и тонкостенных электросварных труб необходимо учитывать явление деформационного старения, которое может привести и к нежелательному снижению технологической пластичности; возможность появления деформационного старения труб необходимо учитывать как при их производстве, так и при дальнейших переделах, т. е. во всей технологической цепочке.

3. При производстве тонкостенных электросварных труб диаметром 8–38 мм в ходе формовки наружные и внутренние слои труб испытывают критические степени деформации растяжения и сжатия соответственно. Рекристаллизационный отжиг таких труб неприемлем, так как приводит к значительному снижению технологической пластичности.

4. Возможность производства труб, не склонных к старению (для тех случаев, когда это важно), может быть обеспечена использованием сталей, не склонных к старению; проведением испытания на склонность к старению при входном контроле проката и окончательном контроле труб; технологией производства труб; изменением существующей или появлением новой НТД (ГОСТ, ТУ), регламентирующей выпуск труб, в которой учтена возможность деформационного старения труб.

Литература

1. Дефекты кристаллического строения металлов / И. И. Новиков: Учеб. пособ. для вузов. М.: Металлургия, 1983.
2. Со11гел1 А. Н., В11бу В. А. // Ргос. Phys. Soc. 1949. А62.
3. Коттрелл А. Х. Структура металлов и свойства. М.: Металлургиздат, 1957.
4. Коттрелл А. Х. Дислокации и пластическое течение в кристаллах. М.: Металлургиздат, 1958.
5. Бабич В. К., Гуть Ю. П., Долженков И. Е. Деформационное старение стали. М.: Металлургия, 1972.
6. Непрерывная термическая обработка автолистовой стали / С. С. Гусева, В. Д. Гурено, Ю. Д. Зварковский. М.: Металлургия, 1979.
7. Влияние ниобия, температур смотки и отжига на микроструктуру, механические свойства и эффект упрочнения при сушке ультранизкоуглеродистых сталей для автомобилестроения / Л. М. Сторожева, К. Эшер, Р. Боде, К. Хулка, Д. А. Бурко // Металловедение и термическая обработка металлов. 2002. № 3. С. 6–12.
8. Получение нестарющей непрерывно отожженной жести / О. Н. Молева, Д. И. Богач. // Сталь. 2006. № 1. С. 59–60.
9. Условия предотвращения старения листовой стали 08Ю после непрерывного отжига / И. Г. Радионова, В. И. Саррак, С. О. Суворова и др. // Сталь. 1986. № 1. С. 71–74.