

DEFECTS IN HEAT TREATMENT OF PRODUCTS FROM STRUCTURAL STEELS AND WAYS TO ELIMINATE THEM**Fomikhina I.**

*Doctor of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Metal Physics of the Institute of Powder Metallurgy named after Academician O.V. Roman National Academy of Sciences of Belarus
Minsk*

ДЕФЕКТЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ И ПУТИ ИХ УСТРАНЕНИЯ**Фомихина И.В.**

*Доктор технических наук, заведующая лабораторией металлофизики Института порошковой металлургии имени академика О.В. Романа НАН Беларуси
г. Минск*

<https://doi.org/10.5281/zenodo.13863462>

Abstract

The article studies technological defects of heat treatment and their influence on the change in structure and destruction of products made of structural steels provided to the accredited Testing Center of the Institute of Powder Metallurgy named after Academician O.V. Roman of the National Academy of Sciences of Belarus by leading enterprises of mechanical engineering and petrochemistry of Belarus. The causes of defect formation and ways of their elimination are shown. Analysis and systematization of the research results will allow eliminating technological defects of heat treatment, increasing the reliability and durability of products made of structural steels.

Аннотация

Исследованы технологические дефекты термической обработки и их влияние на изменение структуры и разрушение изделий из конструкционных сталей, предоставленных в аккредитованный Испытательный центр Института порошковой металлургии имени академика О.В. Романа НАН Беларуси, ведущими предприятиями машиностроения и нефтехимии Беларуси. Показаны причины образования дефектов и пути их устранения. Анализ и систематизация результатов исследования позволят устранить технологические дефекты термической обработки, повысить надежность и долговечность изделий из конструкционных сталей.

Keywords: technological defects, heat treatment, structural steels, destruction, structure, properties.

Ключевые слова: технологические дефекты, термическая обработка, конструкционные стали, разрушение, структура, свойства.

При термической обработке стали могут возникнуть следующие технологические дефекты: недостаточная твердость, пятнистая твердость, повышенная хрупкость, обезуглероживание и окисление поверхности, коробление, деформации и трещины.

Причиной их возникновения является нарушение технологических режимов термической обработки. При нагреве доэвтектоидной стали ниже температуры A_{c1} фазовые превращения происходят не полностью и в структуре стали присутствует феррит, который в ходе закалки не претерпевает изменения, вызывая понижение твердости. Перегрев стали приводит к росту зерна, образованию структуры крупноигльчатого мартенсита и, как следствие, к повышенной хрупкости стали. Обезуглероживание и окисление поверхности происходят при нагреве сталей в печах без контролируемой атмосферы. Обезуглероживание характеризуется выгоранием углерода в поверхностных слоях детали и резко снижает твердость ее поверхности. При окислении на поверхности детали образуется окалина, которая приводит к неравномерной твердости, в результате чего возникает необходимость дополнительной обработки. Для предохранения от окисления и обезуглероживания детали необходимо нагревать в печах с контролируемой защитной или

нейтральной атмосферой. Деформации, коробление и трещины образуются при слишком резком или неравномерном охлаждении или нагреве деталей. Для предотвращения указанных дефектов необходимо правильно назначать режимы термической обработки.

Макро- и микротрещины. Деформация, коробление и трещины являются следствием внутренних напряжений. Медленное охлаждение при закалке в области мартенситного превращения – самый эффективный способ уменьшения напряжений и устранения дефектов этого вида. Мелкие детали, также как и простые по форме, без острых углов и резких переходов, менее склонны к короблению. Более сложные по форме детали целесообразно изготавливать из легированных, закаливаемых в масле сталей, чем из углеродистых, закаливаемых в воде [1, 2].

Трещины – неисправимый дефект, предупредить который можно конструктивным решением (избегать в изделии конструктивных элементов, которые могут стать концентраторами напряжений) и тщательным соблюдением режимов термообработки. Деформация, т.е. изменение раз-

меров и формы изделий, всегда сопровождается процессы термической обработки, особенно закалки. Несимметричную деформацию изделий в практике часто называют короблением. Деформацию можно уменьшить подбором соответствующего состава стали и условий термической обработки, а избежать коробления можно, обеспечив равномерность нагрева под закалку и правильное положение детали при погружении в закалочную среду.

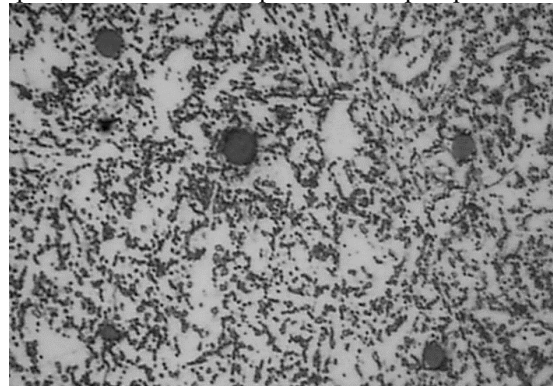
Образование трещин после отжига по стандартным режимам наблюдалось в поковке из стали 40X13. Исследование микроструктуры показало, что в образце присутствует незначительная загрязненность неметаллическими включениями. Наблюдаются точечные оксидные включения не более 2 балла (рис. 1, а). Материал находится в отожженном состоянии. Микроструктура неоднородна и представляет собой зернистый перлит (рис. 1, б).

Присутствуют участки бейнита, образованные в результате подстуживания поковки (рис. 1, в). Неоднородность структуры и наличие участков бейнита вызвали напряженное состояние в материале и растрескивание. Наблюдается раскрытая трещина с оксидным слоем по краям, выходящая на поверхность поковки, глубиной до 1,4 мм и шириной раскрытия порядка 0,3 мм (рис. 1, г). В сердцевине поковки присутствует множество закрытых микротрещин, заполненных оксидом, с обезуглероженным краем (рис. 1, д, е). Характер изменения микроструктуры вокруг микротрещин и заполнение их оксидами свидетельствует об образовании их при прокатке. Термообработка (отжиг) раскрыла более глубокие и развитые трещины проката.

Исследование микроструктуры показало, что трещины в поковке образовались при прокате.



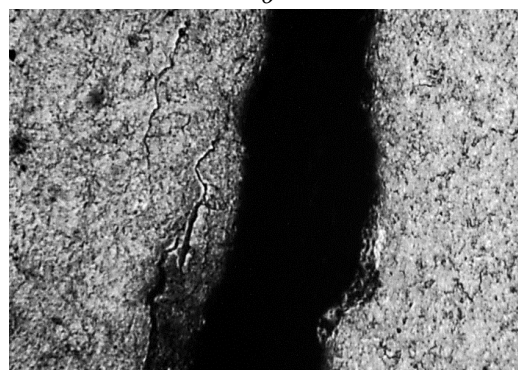
а



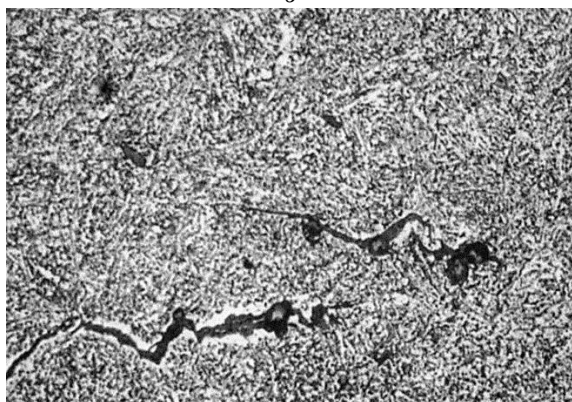
б



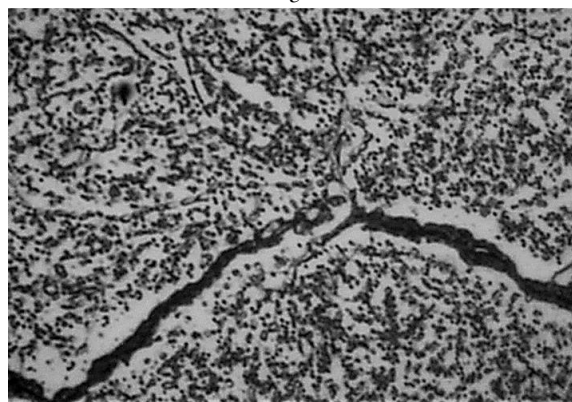
в



г



д



е

Рис. 1. Микроструктура поковки из стали 40X13 после отжига (а, в, д, x100), (б, г, е, x500): а – загрязненность неметаллическими включениями; б, в – неоднородность структуры; г-е – трещины, раскрывшиеся во время отжига

Для определения причины разрушения венца и шестерни был проведен анализ элементного состава, исследование структуры, морфологии излома, измерение твердости.

Ближайшим отечественным аналогом материала шестерни является сталь марки 20Г (ГОСТ 4543-71 «Прокат из легированной конструкционной стали»), но отличается более высоким содержанием марганца (по ГОСТ Мп должно быть 0,70 – 1,00 %). Общий вид венца и шестерни, морфология излома под смятым зубом шестерни представлены на рис. 2. Определено, что вершины зубьев венца и шестерни смяты (рис. 2, а, б, в, г, е).

В результате разрушения на шестерне отсутствуют три зуба. Начало разрушения зубьев находится на участке сопряжения зубьев с основным металлом шестерни, характер излома вязкий (рис. 2, г). Определено, что разрушение шло постепенно (усталостное разрушение). Первые трещины появились на зубе № 1 в нескольких местах и распространялись постепенно, пока не слились в единый фронт. Затем прошло катастрофическое разрушение. На зубе № 2 очаг разрушения находится в одном месте, что свидетельствует об ударной нагрузке. Это значит, что развалившийся зуб № 1 ударил зуб № 2 и произошло катастрофическое одномоментное разрушение.

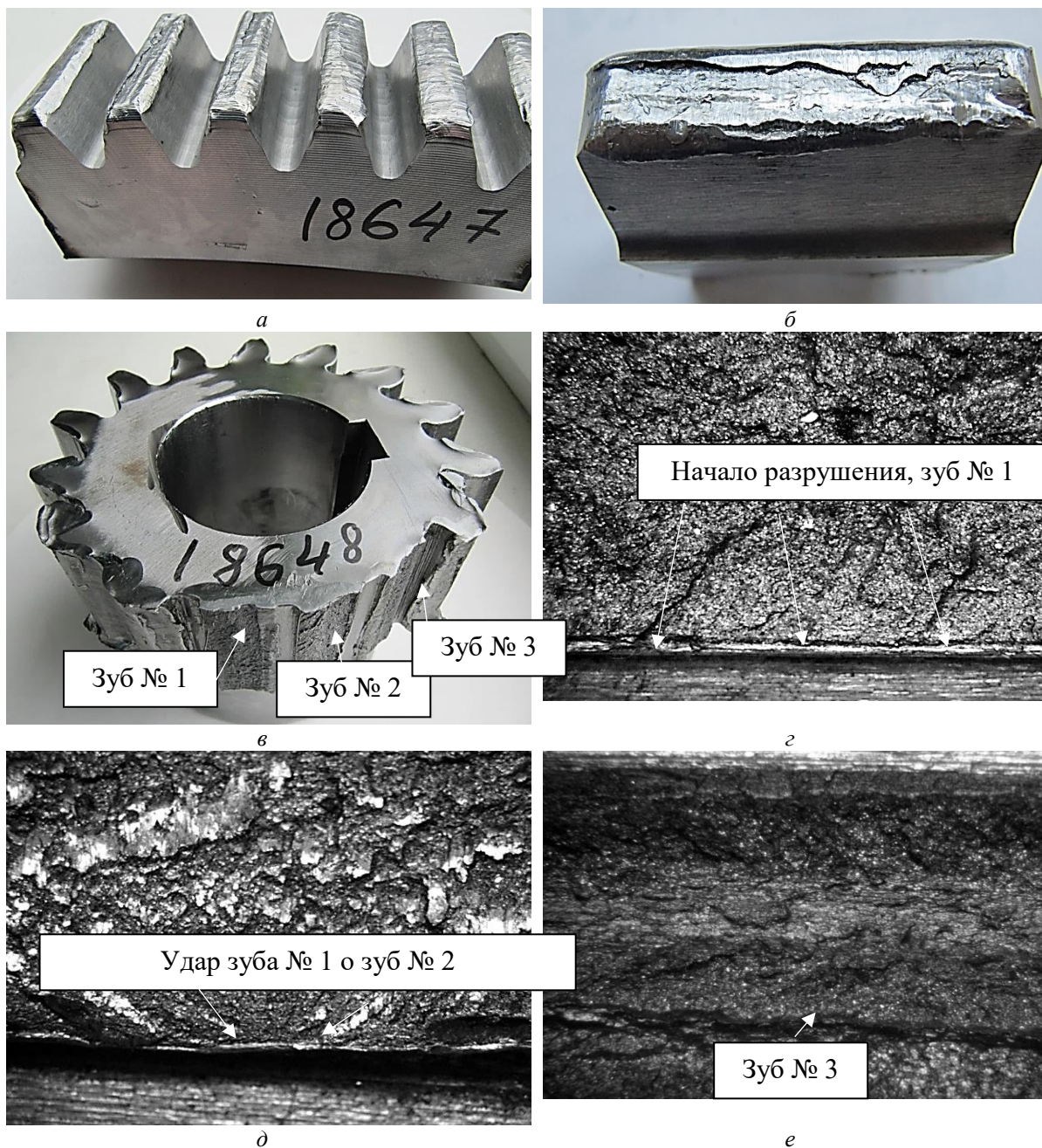


Рис. 2. Венец и шестерня: а – общий вид венца; б – смятый зуб венца; в – общий вид шестерни; г – морфология излома под разрушенным зубом № 1 шестерни (множественные очаги); д – морфология излома под разрушенным зубом № 2 шестерни (очаг удара зуба № 1 о зуб № 2); е – морфология излома зуба № 3 (катастрофическое разрушение)

Микроструктура венца и шестерни у края зуба и в сердцевине феррито-перлитная (рис. 3). Микроструктура получена в результате горячей прокатки или после нормализации. Упрочня-

ющая обработка поверхности (ТВЧ-закалка, химико-термическая обработка) и термообработка (закалка с отпуском) отсутствуют.

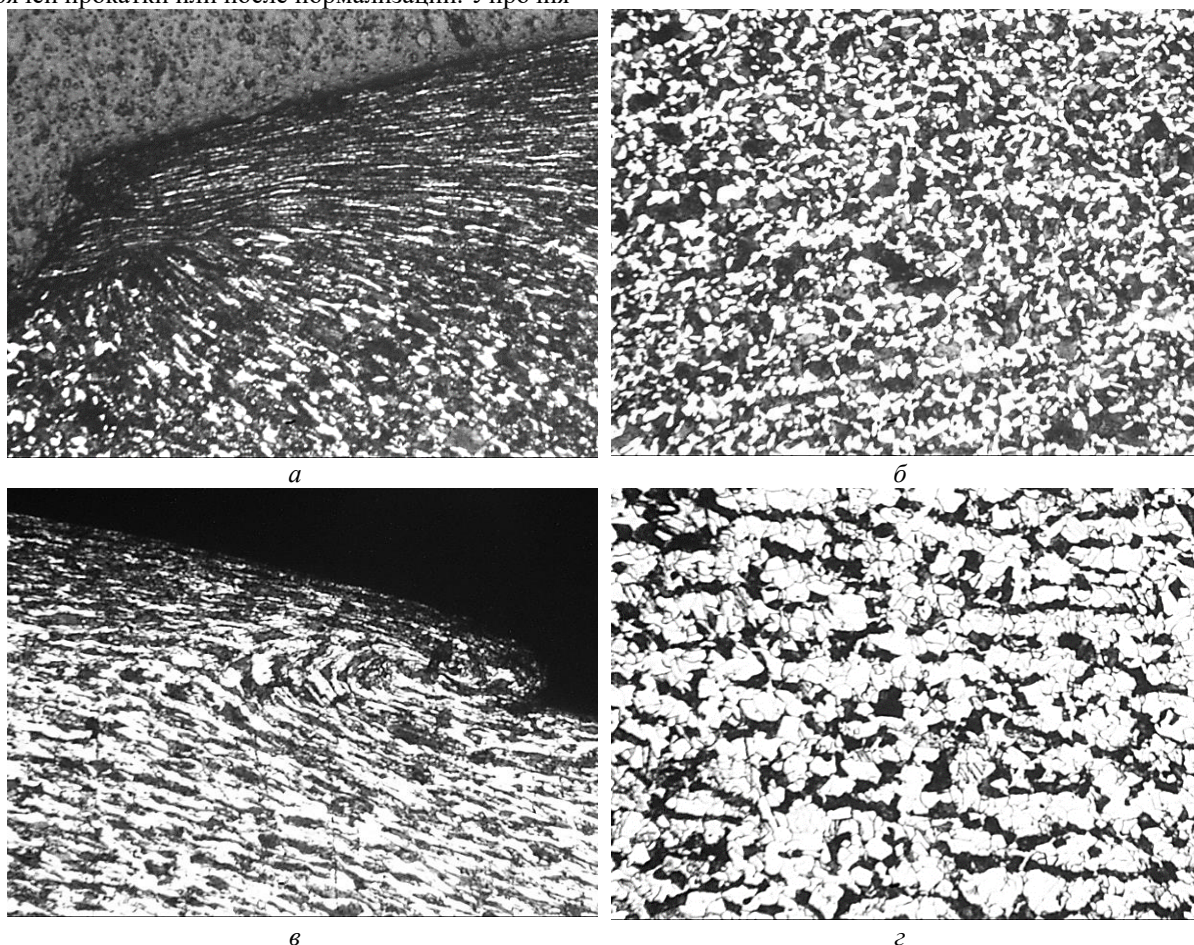


Рис. 3. Микроструктура венца и шестерни, $\times 100$: а – край смятого зуба венца; б – сердцевина венца; в – край смятого зуба шестерни; г – сердцевина шестерни

Твердость составляет 160-170 НВ. На участках смятия зубьев венца и шестерни наблюдается сильное течение материала, что подтверждает отсутствие термообработки. Это связано с заклиниванием шестерни 3-мя разрушенными зубьями. Проведенные исследования показали, что разрушение венца и шестерни произошло из-за отсутствия упрочняющей термообработки. Горячекатаное состояние и нормализация, в которых, предположительно, находятся венец и шестерня не могут обеспечить достаточный уровень прочностных свойств.

Пятнистая твердость. Недостаточная твердость закаленной детали может быть из-за недогрева (низкая температура в печи, недостаточная выдержка при правильной температуре в печи) или недостаточно интенсивного охлаждения [3]. В первом случае мартенсит не обладает достаточной твердостью (не содержит достаточно углерода); во втором - не переохлаждается до мартенситного превращения, и структура полностью или частично состоит из продуктов перлитного распада аустенита (троостит, сорбит). Повышение температуры печи или увеличение выдержки в первом случае устраняет пониженную твердость закаленных деталей.

Во втором случае следует применять более интенсивное охлаждение, т. е. во время закалки энергично перемещать деталь в закалочной жидкости или применять вместо простой воды соленую или подкисленную. Неоднородная, или, как ее еще называют, пятнистая твердость проявляется в том, что после закалки на отдельных участках детали твердость оказывается значительно сниженной (до HRC 35 – 45) по сравнению с другими участками, где величина ее нормальная и составляет HRC 60 – 62. Такого рода дефект может быть вызван в основном тремя причинами: неравномерным нагревом, неравномерной скоростью охлаждения, неудовлетворительной структурой стали перед закалкой.

Для установления причины образования пятнистой твердости и разрушения проведен анализ элементного состава, исследование микроструктуры, морфологии излома металлоизделия «Шкив тормозной 30M.2332.001». По элементному составу с учетом погрешности измерений образец шкива соответствует стали марки 65Г (ГОСТ 14959-79 «Сталь рессорно-пружинная углеродистая и легированная»).

Общий вид и морфология излома разрушенного тормозного шкива представлены на рис. 4.



Рис. 4. Образец «Шкив тормозной 30M.2332.001»: а – общий вид; б – морфология излома; в – долом

Изучение микроструктуры показало, что в образце тормозного шкива присутствуют неметаллические включения в виде оксидов строчечных 4 балла и силикатов хрупких 3 балла (рис.5).

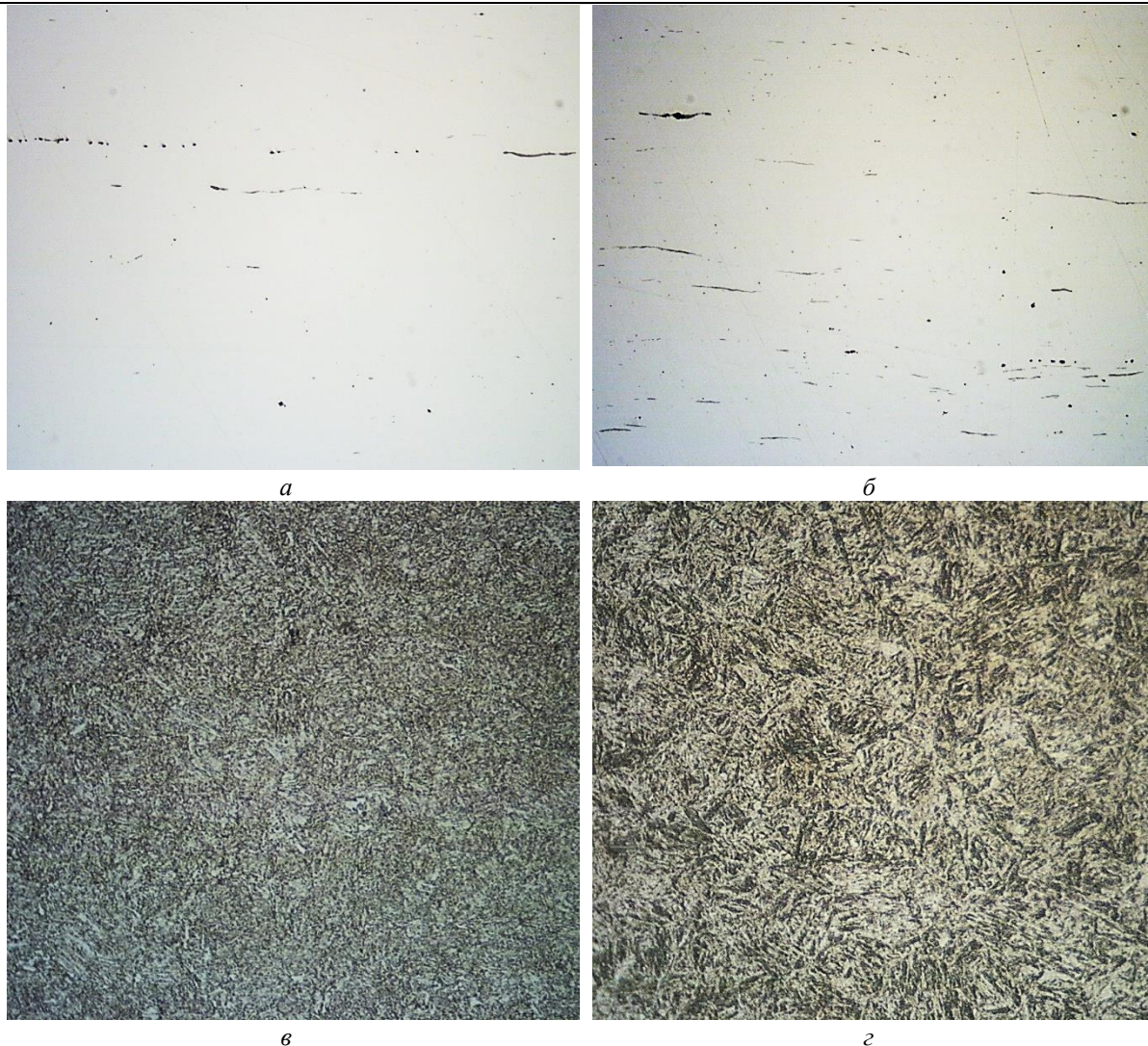


Рис. 5. Микроструктура образца тормозного шкива, $\times 100$, $\times 500$:

а, б – загрязненность неметаллическими включениями;

в – участок мелкоигольчатого мартенсита; г – пятнистость (мелкоигольчатый мартенсит + крупноигольчатый троостит (бейнит))

Наблюдается пятнистая микроструктура мелкоигольчатого мартенсита с участками крупноигольчатого троостита (бейнита). Твердость образца находится в диапазоне 47 – 55 HRC, что не соответствует требованиям чертежа. По чертежу твердость должна составлять 36 – 43 HRC.

Результаты исследования показали, что причиной разрушения шкива тормозного является превышение требуемой температуры заковки образца, вызвавшее повышенную твердость, пятнистую структуру мелкоигольчатого мартенсита с участками крупноигольчатого троостита (бейнита).

На основании практического опыта установлено, что неравномерный нагрев различных участков детали возникает при подстуживании со стороны заслонки печи, при неудачной укладке деталей в печи и при неоднородном распределении температуры в различных зонах ее рабочего пространства. В результате отдельные участки детали не нагреваются до требуемой температуры, и твердость их после заковки оказывается пониженной.

Неравномерное охлаждение возникает при покрытии детали неравномерным толстым слоем окалины, которая затрудняет теплоотвод при заковке или при образовании паровых мешков в углублениях, имеющихся на деталях, иногда при касании деталей во время охлаждения в баке. Образование мягких пятен также является следствием недостаточного прогрева или недостаточно интенсивного охлаждения. Иногда мягкие пятна появляются из-за неоднородности исходной структуры, например скоплений феррита. В этих местах при нагреве до температуры заковки может сохраниться феррит или получиться аустенит с недостаточной концентрацией углерода. Естественно, что в этих местах даже при правильно проведенной заковке твердость недостаточная. Предварительная термическая обработка (нормализация), создающая более однородную структуру, устраняет этот дефект [3]. Образование мягких пятен (пятнистая твердость) характерно для углеродистых сталей, охлаждаемых при заковке в воде. Это вызвано образованием паровой рубашки при кипении воды. От участков кон-

такта детали и пузырьков пара отвод тепла замедляется, так как теплопроводность пара значительно меньше, чем жидкости - воды. Мартенсит при этом не образуется из-за пониженной скорости охлаждения. Кроме того, пятнистая твердость может образоваться при наличии окалины, в местах захвата закалочными клещами и т.д.

Для предотвращения этого дефекта необходимо подводить закалочную жидкость к деталям под давлением или энергично перемещать деталь в закалочной жидкости, сбивая паровую рубашку; перед закалкой следует удалять окалину; закалочные клещи должны иметь острые губки, чтобы не препятствовать охлаждению детали в месте захвата. Пятнистая твердость предотвращается при охлаждении в растворах солей или щелочей (8...12%-ные водные растворы NaCl и NaOH), однако при этом возрастает скорость охлаждения и вероятность коробления заготовки или появления трещин.

Причиной пятнистой твердости может быть неоднородность структуры стали перед закалкой. Например, если в структуре имеются крупные обособленные участки феррита, то при нагреве до закалочной температуры аустенит, образующийся в этих участках, будет обеднен углеродом. Требуется слишком большое время выдержки при закалочной температуре, чтобы углерод из обогащенных участков (где раньше были зерна перлита) смог переместиться к обедненным участкам. В связи с этим в местах, обедненных углеродом, при закалке получится не мартенсит, а структура типа сорбита

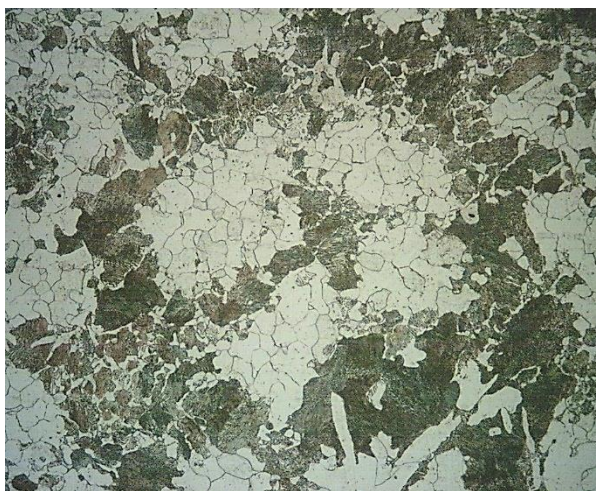
или троостита, которая имеет более низкую твердость. Неоднородность структуры перед закалкой можно устранить путем отжига или нормализации.

Для определения причины отсутствия необходимой твердости после закалки, были проведены исследования структуры, измерение твердости образцов-свидетелей из стали 35Л, прошедших термическую обработку: отжиг (образец № 1), двойной отжиг (образец № 2), отжиг + закалка (образец № 3).

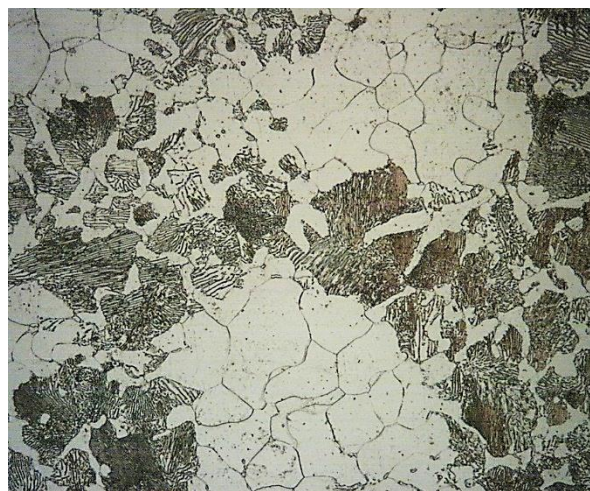
В образце-свидетеле с маркировкой № 1 после отжига наблюдается феррито-перлитная структура, представляющая ферритные ячейки, окруженные сеткой перлитных зерен. Ферритное зерно неравномерно по размеру и составляет 10 – 80 мкм. Присутствуют ферритные зерна игольчатой формы типа видманштетта (рис. 6, а, б). Твердость образца 160 НВ.

После двойного отжига (образец № 2) происходит выравнивание по размеру зерна феррито-перлитной структуры, с уменьшением ферритного зерна до 10 – 30 мкм (рис. 6, в, г). Ферритные зерна типа видманштетта сглажены и не имеют выраженной остроугольности. Твердость образца составляет 140-150 НВ.

После отжига и закалки (образец № 3) наблюдается неоднородная феррито-перлитная структура, представляющая зерна сорбитообразного перлита размером от 10 до 90 мкм, окруженные сеткой феррита. Присутствуют ферритные зерна типа видманштетта (рис. 6, д, е). Твердость образца составляет 210-220 НВ. Закалочная структура отсутствует.



а



б

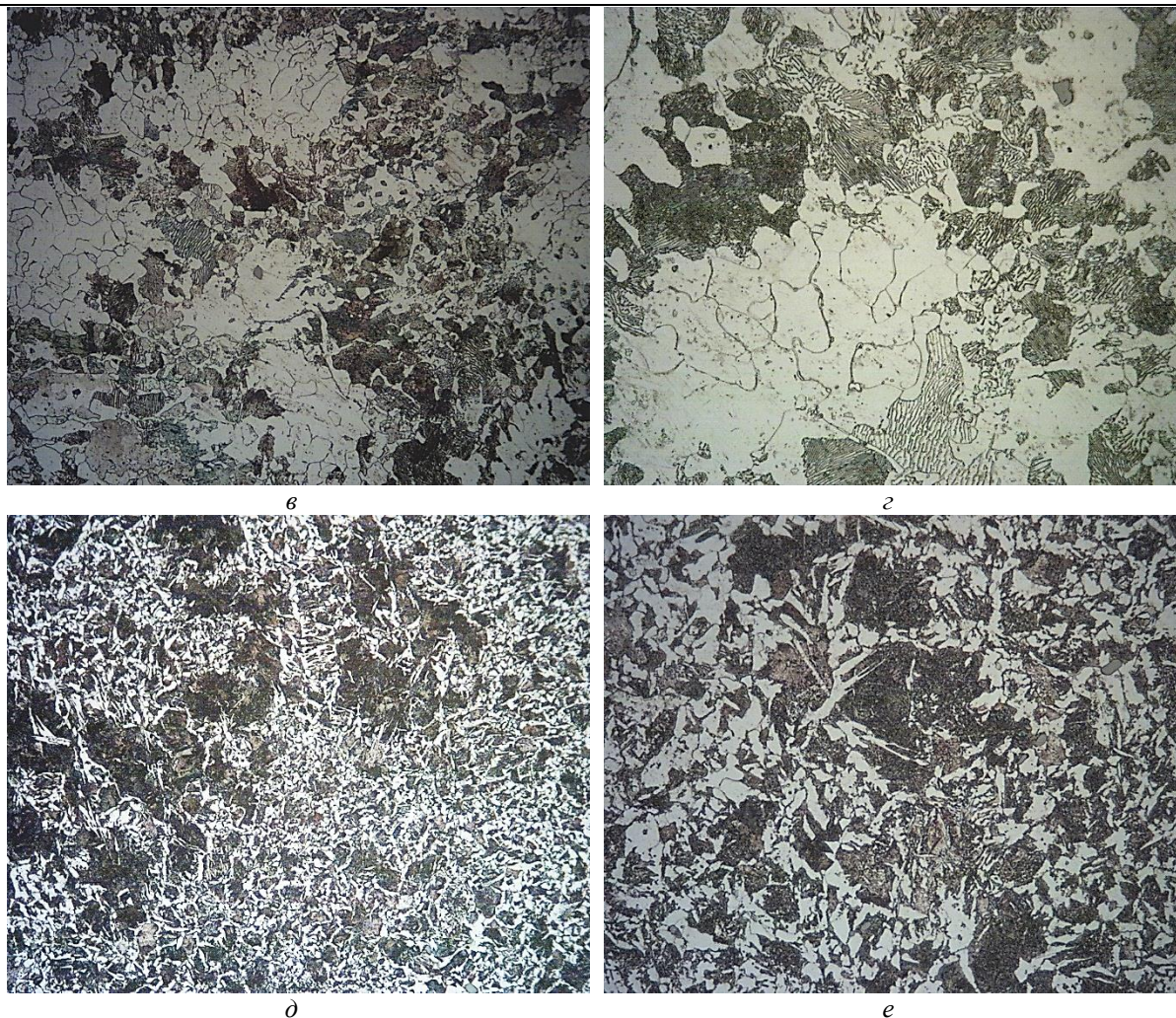


Рис. 6. Микроструктура образцов-свидетелей после термообработки, x200, x500:
 а, б – образец № 1, отжиг; в, г – образец № 2, двойной отжиг;
 д, е – образец № 3, отжиг + закалка

Результаты исследования показали, что проведение последующей закалки после отжига не привело к закалочным микроструктурам из-за большой неоднородности микроструктур отжига и присутствия крупных обособленных участков-ячеек феррита. Для получения закалочных структур необходимо проведение гомогенизирующего отжига или нормализации перед закалкой для выравнивания феррито-перлитной структуры.

Недостаточная твердость закаленного изделия появляется в результате неправильно выбранной температуры закалки или недостаточно интенсивного охлаждения. При закалке доэвтектоидных сталей недостаточная твердость может получиться в результате того, что температура закалки была ниже A_{C3} и в структуре стали сохранился феррит. Кроме того, в доэвтектоидной стали пониженная твердость может быть результатом перегрева. Образование при этом крупноиглочатой структуры мартенсита, помимо пониженной твердости, вызывает понижение ударной вязкости [4].

В заэвтектоидных сталях недостаточная твердость закаленного изделия может также являться результатом перегрева и образования крупноиглочатого мартенсита.

Образование мягких пятен может являться результатом неравномерного охлаждения, соприкосновения деталей друг с другом в процессе охлаждения, наличия жировых пятен на поверхности изделия и неоднородности структуры. Исправляется такой брак повторной закалкой изделия. Неоднородность структуры устраняется предварительной его нормализацией.

Обезуглероживание или науглероживание поверхностных слоев.

Обезуглероживание, как дефект термической обработки стали, проявляется в выгорании углерода в поверхностных слоях металла изделия при нагреве его в атмосферной среде, содержащей углекислый газ или водород, а также пары воды, и приводит к значительному снижению прочностных свойств и изменению химического состава материала поверхности изделия (несоответствию заявленной марке стали детали) [4]. Глубина обезуглероживленного слоя может достигать от 2 до 4 мм.

Поверхностные трещины (глубиной 1,2 – 2 мм), сопутствующие обезуглероживанию:

- могут проявляться в основном в изделиях, выполненных из сталей инструментального класса,

прокаливающихся полностью или на большую глубину и обладающих обезуглероженным слоем;

- возникают вследствие растягивающих напряжений, спровоцированных образованием в обезуглероженном слое меньшего объема низкоуглеродистого закалочного мартенсита, чем в сердцевине изделия.

Окисление и обезуглероживание – брак, характеризующийся образованием окалины на поверхности стальных изделий и выгоранием углерода в поверхностных слоях. Такой брак термической обработки неисправим, но если позволяет припуск на механическую обработку, то окисленный и обезуглероженный слой удаляют шлифовкой. Окисление и обезуглероживание поверхности часто происходит при нагреве в пламенных или электрических печах без контролируемой атмосферы. Поэтому дают припуск на шлифование, что удорожает и усложняет технологию изготовления термически обрабатываемых деталей. Контролируемая искусственная атмосфера в термических печах является радикальным способом устранения или уменьшения этого дефекта. Нагрев в солях также способствует уменьшению окисления и обезуглероживания. При термической обработке ответственных деталей и инструмента обезуглероживание вообще недопустимо; в таких случаях нагрев деталей ведут в специальных защитных атмосферах. Изменение

химического состава поверхностных слоев заготовок происходит при нагреве в воздушной атмосфере электропечей; в атмосфере сгорания газов в газовых печах. При нагреве в этих средах происходят реакции металла с печными атмосферами. Окисление стали начинается при 200 °С (при этом появляются цвета побежалости). Повышение температуры усиливает окисление и вызывает появление окалины – на стальных заготовках образуются рыхлые, слабо связанные с основным металлом оксиды железа. При температуре свыше 700 °С начинается обезуглероживание поверхности стальных заготовок. Эти процессы развиваются тем интенсивнее, чем выше температура и больше продолжительность выдержки. Предотвратить обезуглероживание при нагреве возможно применением специальных нагревательных защитных атмосфер. В промышленности используют защитные газовые, вакуумные и жидкие среды. Для нагрева инструмента наибольшее распространение получил нагрев в жидких средах и вакууме.

Для определения причины повышенного износа осей и катков с маркировками № 1 и 2, было проведено измерение твердости на изношенной и неизношенной частях и исследование микроструктуры осей. Общий вид осей и катков представлен на рис. 7.



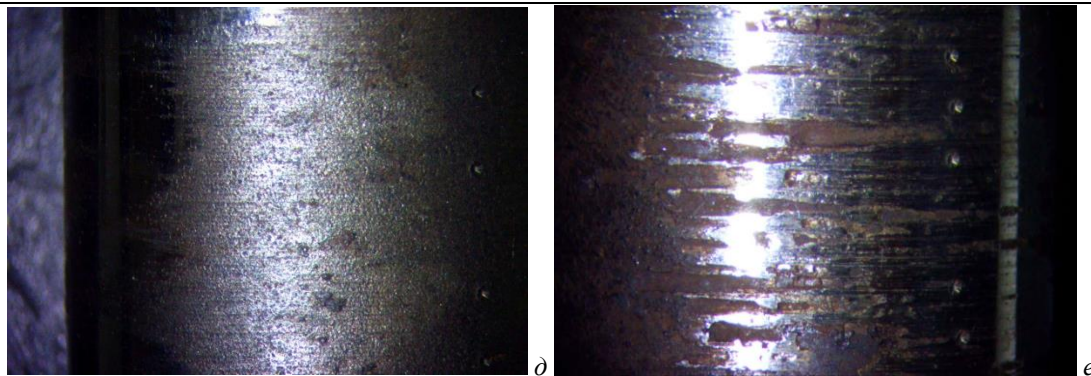


Рис. 7. Исследуемые оси и катки с маркировками № 1 (а-в) и № 2 (г-е):
а, г – общий вид; б, е – морфология поверхности изношенных участков осей; в, д – морфология поверхности неизношенных участков осей

На рис. 7 показано, что на осях с маркировками № 1 и № 2 присутствуют участки износа. На оси с маркировкой № 1 наблюдается значительный износ в виде бороздок. На оси с маркировкой № 2 присутствует незначительный износ в виде затертостей поверхности с небольшими углублениями.

Твердость обезуглероженного слоя определялась на микротвердомере с последующим переводом чисел твердости в твердость по Роквеллу по таблице ASTM.

Результаты измерения твердости и определения глубины обезуглероженного слоя представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Результаты измерения твердости и глубины обезуглероживания

Маркировка образца	Ось				Каток
	Изношенный участок		Неизношенный участок		Поверхность
	Твердость HRC	Глубина обезуглероженного слоя, мкм	Твердость, HRC	Глубина обезуглероженного слоя, мкм	Твердость, HRC
Ось № 1	25-27	*	Край – <20 (190-220 Hv); Сердцевина – 25-27	до 300	37-42
Ось № 2	42-45	*	45-47	отсутствует	38-43
Примечание: *Износ края поверхности					
Требования чертежа: твердость оси 42-47 HRC; твердость катка 35-45 HRC, глубина обезуглероженного слоя не регламентируется					

В результате исследований получены следующие результаты:

- в образце оси с маркировкой № 1 твердость на изношенном участке поверхности и в сердцевине неизношенного участка находится в одном диапазоне значений и составляет 25-27 HRC. Край неизношенного участка обезуглерожен на глубину до 300 мкм. Твердость обезуглероженного слоя составляет $H_v = 190-220 \text{ кгс/мм}^2$, что соответствует 90-95 HRB (менее 20 HRC). Микроструктура представляет собой сорбит. Твердость не соответствует требованиям чертежа;

- в образце катка с маркировкой № 1 твердость поверхности составляет 37-42 HRC и соответствует требованиям чертежа;

- в образце оси с маркировкой № 2 твердость на изношенном и на неизношенном участках поверхности находится в диапазоне требований чертежа (42-47 HRC). Обезуглероженный слой отсутствует. Микроструктура представляет собой троостсорбит, троостит;

- в образце катка с маркировкой № 2 твердость поверхности составляет 38-43 HRC и соответствует требованиям чертежа.

Было определено, что износ поверхности оси с маркировкой № 1 произошел в результате нарушения режима термообработки, которое привело к образованию на поверхности обезуглероженного слоя глубиной до 300 мкм и получению микроструктуры с твердостью, несоответствующей требованиям чертежа.

Проблемы науглероживания (цементации) материалов рассматриваются с учетом реализации метода упрочнения в промышленных условиях, предварительно уточнив существующие последовательности фазовых и структурных превращений в стали при осуществлении таких методов обработки поверхности. Особенно это относится к установлению причин появления в производственных условиях структурных дефектов, приводящих к снижению эксплуатационных свойств изделий.

Термин науглероживание означает диффузионное насыщение углеродом поверхностного слоя металла или сплава. Например, науглероживание (цементация) стальных изделий проводится для повышения их твердости и износостойкости. При этом существует острая необходимость в определении не только фазовых и структурных состояний диффузионного слоя, но и его геометрических размеров, соотношением между толщинами отдельных составляющих слоя (в первую очередь, диффу-

зионной зоны и зоны химических соединений), соотношением между твердостью слоя (его составляющих) и твердостью исходного материала.

Изучение проблемы науглероживания и получения пятнистой твердости проводилось на разрушенной детали «Звездочка». По элементному составу с учетом погрешности измерений образец соответствует стали марки 20Х2Н4А (ГОСТ 4543-71 «Прокат из легированной конструкционной стали»).

Фотографии микроструктуры цементованного слоя в районе разрушения представлены на рис. 8.

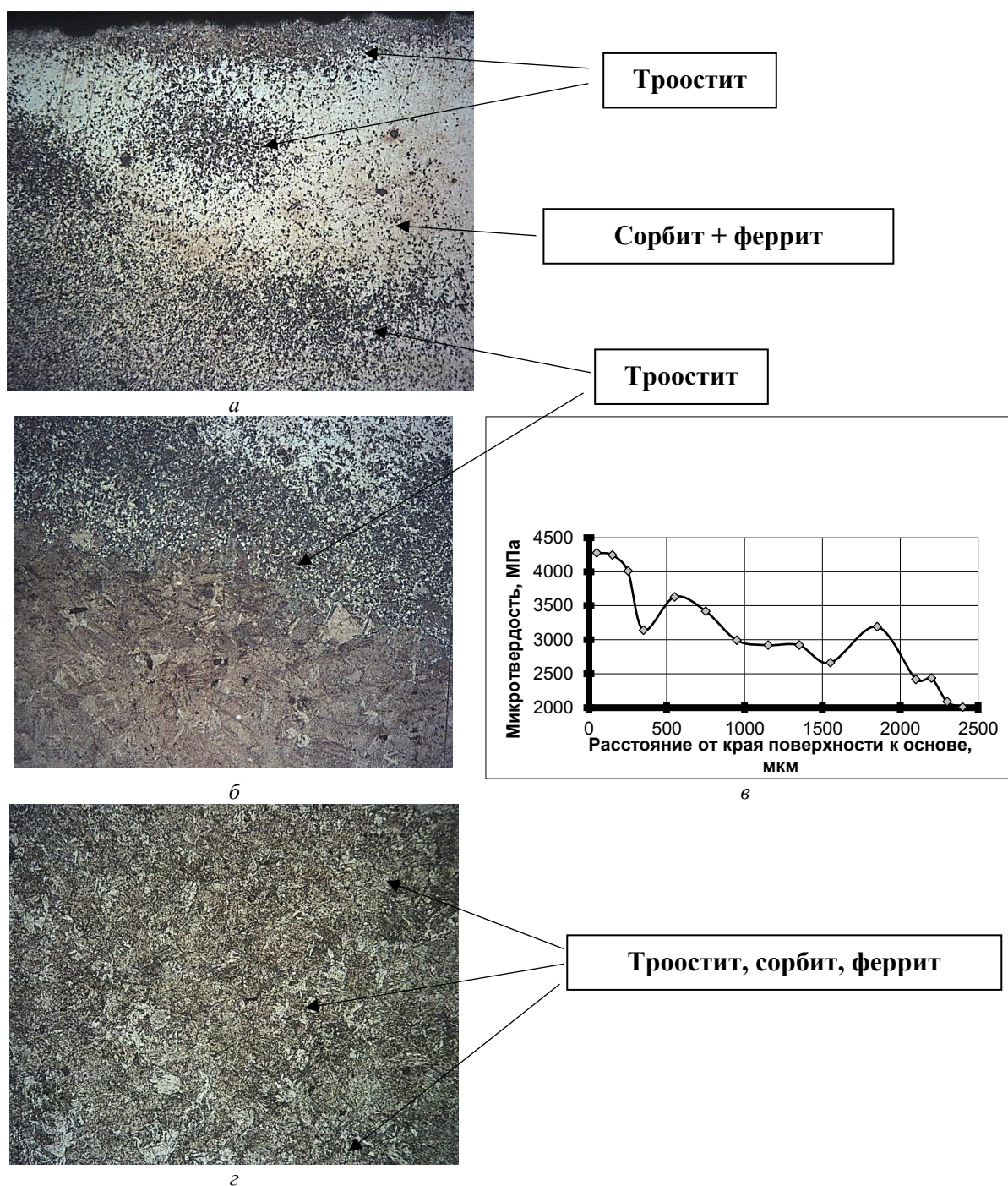


Рис. 8. Микроструктура детали «Звездочка» в районе разрушения, $\times 100$:
 а – край цементованного слоя; б – переходная зона «цементованный слой – основа»;
 в – график микротвердости; е – сердцевина

Определено, что глубина цементации составляет 2,0 – 2,5 мм, что больше значения, указанного в чертеже и соответствует ему по верхнему пределу (1,5 – 2 мм). Микротвердость цементованного слоя от края поверхности до переходного слоя в сердцевину находится в диапазоне 4200 – 2600 МПа (43 – 24 HRC).

Структура цементованного слоя пятнистая: присутствуют участки троостита с микротвердостью 4200 МПа и сорбита с ферритом с микротвердостью 2600 МПа. Структура сердцевины представляет собой троостит, сорбит, феррит со средней микротвердостью 2400 МПа. Средняя твердость сердцевины детали составляет 22 HRC. После цементации деталь подвергалась закалке с низким отпуском, о чем свидетельствуют закалочные структуры, однако твердость не соответствует твердости чертежа (по чертежу $HRC \geq 50$).

Из проведенных исследований установлено, что разрушение детали «Звездочка» произошло из-за нарушения режима цементации, о чем свидетельствует присутствие "пятнистой цементации" с мягкими пятнами недостаточной твердости 43 – 24 HRC по сравнению с требованиями чертежа.

Повышенная хрупкость.

Повышенная хрупкость - дефект, обычно появляющийся в результате закалки от слишком высоких температур (более высоких, чем это требуется), при которых произошел значительный рост зерен аустенита. Дефект обнаруживается механическими испытаниями по излому или по микроструктуре. Устраняют дефект повторной закалкой от нормальных температур для данной стали. К основным дефектам, которые могут возникнуть при закалке сталей, относят трещины и деформацию.

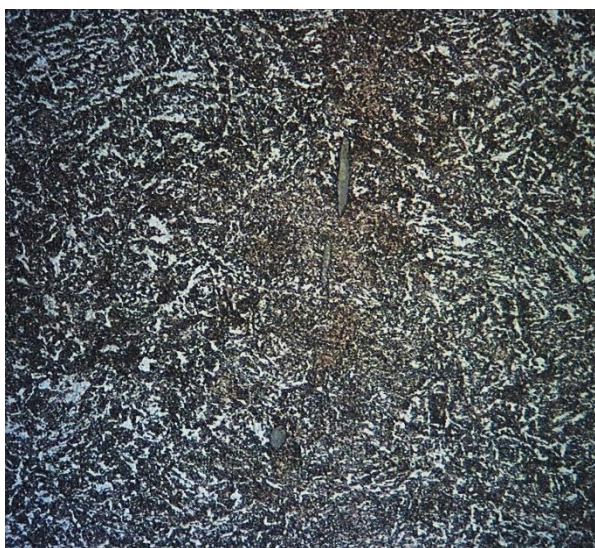
Деформация, коробление и трещины являются следствием внутренних напряжений. Медленное охлаждение при закалке в области мартенситного превращения – самый эффективный способ уменьшения напряжений и устранения дефектов этого

вида. Мелкие детали, также как и простые по форме, без острых углов и резких переходов, менее склонны к короблению. Более сложные по форме детали целесообразно изготавливать из легированных, закаливаемых в масле сталей, чем из углеродистых, закаливаемых в воде.

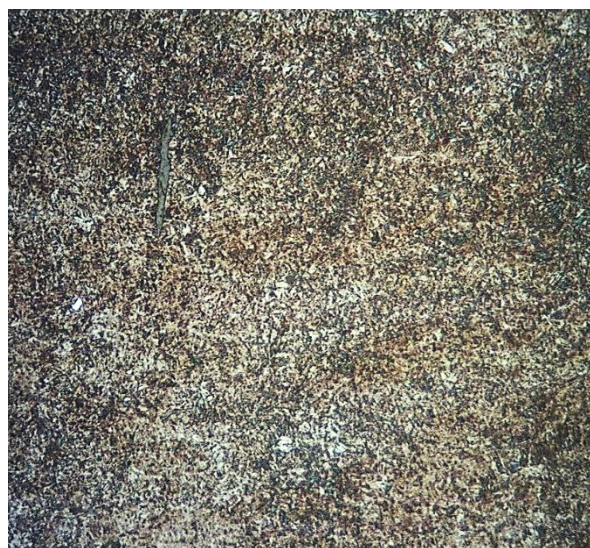
Перегрев стали можно устранить. Для этого применяют отжиг до температур, на 40...60 °С превышающих температуру начала аустенитного превращения. После некоторой выдержки заготовки медленно охлаждают вместе с печью. В теплое время года возможно охлаждение на спокойном воздухе (без сквозняков и искусственных воздушных потоков). В результате зерна становятся мельче, приобретают округлую форму, а металлу возвращаются его прежние физико-механические характеристики.

Необратимым дефектом термообработки является пережог. Он возникает при нагреве стали до температур ниже температуры начала плавления на 50...100 °С. При таких температурах неметаллические включения в стали, располагающиеся всегда по границам зёрен – сера и фосфор – плавятся. Этому сопутствует также интенсивное окисление, которое проходит по границам зерен. Пережженный металл полностью теряет свою пластичность, следствием чего является появление рваных трещин при последующей ковке или прокатке. Восстановить исходную структуру такой стали невозможно [4, 5].

Для определения причины ухудшения качества работы образца затвора, связанного с нарушением режима термической обработки, был проведен анализ элементного состава, исследование микроструктуры, измерение твердости. По элементному составу с учетом погрешности измерений ближайшим отечественным аналогом данного образца является сталь типа ХНЗА (ГОСТ 4543-71 «Прокат из легированной конструкционной стали»).



a



б

Рис. 9. Микроструктура затвора, х500: а – крупноигльчатый троостит (бейнит); б – мелкоигльчатый троостомартенсит

Исследования показали, что микроструктура образца затвора неоднородна по сечению: в широкой части присутствует крупноигльчатый троостит (бейнит) с твердостью 42 – 45 HRC, в узкой – мелкоигльчатый троостомартенсит с твердостью 45 – 50 HRC (рис. 9, а, б).

Результаты проведенных исследований показали, что ухудшение качества работы затвора вызвано нарушением режимов термообработки – закалки с отпуском, о чем свидетельствует неоднородность структуры и присутствие грубой структурной составляющей – крупноигльчатого троостита (бейнита), пониженной твердости.

Устранение дефектов термической обработки.

Исходя из систематизации и анализа проведенных исследований, можно сделать вывод, что характерной причиной дефектов при термообработке

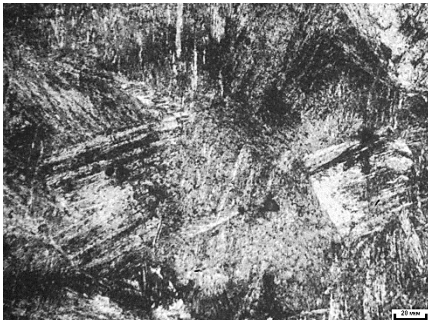
является несоблюдение режимов нагрева и охлаждения, в результате чего структура и свойства сплава не соответствуют заданным. Наиболее опасными дефектами термообработки являются трещины. Они возникают в результате резкого нагрева или охлаждения (микро- и макротрещины), насыщения поверхностного слоя водородом (водородные трещины).

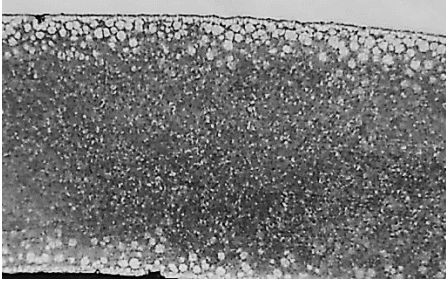
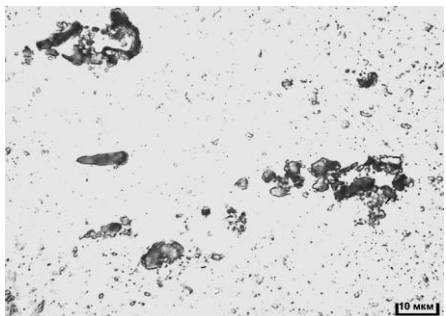
Неправильно проведенная закалка стали приводит к дефектам (браку изделия). Наиболее распространенные из них:

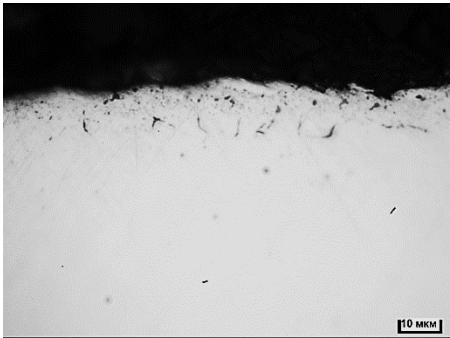
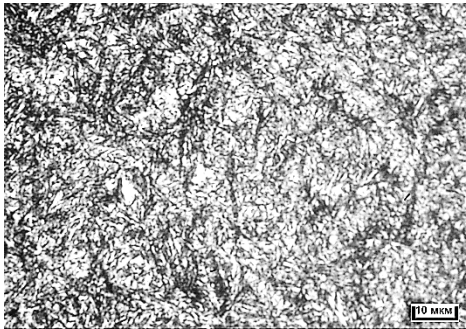
- недостаточная твердость закаленного изделия, мягкие пятна;
- пережог и закалочные трещины;
- обезуглероживание и окисление поверхности;
- коробление и деформация;

Дефекты термообработки, причина образования и способы их устранения приведены в табл.2.

Таблица 2. Дефекты термообработки, причина образования и способы их устранения

Тип дефекта	Причина образования	Способы устранения
1	2	3
Недостаточная твердость закаленного изделия, образование мягких пятен   	Неправильно выбранная температура закалки (температура закалки ниже A_{C3}) в структуре стали сохранился феррит или недостаточно интенсивное охлаждение при закалке доэвтектоидных сталей. В доэвтектоидной стали пониженная твердость может быть результатом перегрева. Образование при этом крупноигльчатой структуры мартенсита, помимо пониженной твердости, вызывает понижение ударной вязкости. В заэвтектоидных сталях недостаточная твердость закаленного изделия может являться результатом перегрева и образования крупноигльчатого мартенсита. Образование мягких пятен является результатом неравномерного охлаждения, соприкосновения деталей друг с другом в процессе охлаждения, наличия жировых пятен на поверхности изделия и неоднородности структуры.	Исправляется брак повторной закалкой изделия. Неоднородность структуры устраняется предварительной его нормализацией.

Окисление и обезуглероживание  	Брак характеризуется образованием окалины на поверхности стальных изделий и выгоранием углерода в поверхностных слоях. Такой брак термической обработки не исправим, но если позволяет припуск на механическую обработку, то окисленный и обезуглероженный слой удаляют шлифовкой.	Для предотвращения этого вида брака нагрев изделий рекомендуется проводить в печах с нейтральной атмосферой либо в жидких средах.
Пережог  	Пережог наступает при весьма высоких температурах нагрева, близких к температуре плавления, поэтому имеет место проникновение кислорода внутрь металла и образование окислов, располагающихся по границам зерен, или даже оплавление металла по границам зерен. Это нарушает сплошность металла, и, как результат, он становится не пригодным для применения	Такой брак термической обработки также не исправим.

Закалочные трещины  	Результат слишком быстрого и неравномерного нагрева, либо слишком быстрого охлаждения, либо наличия на детали резких переходов сечений, где возникают большие внутренние напряжения, приводящие к растрескиванию. Могут получиться, если после закалки деталь сразу не подвергли отпуску для снятия внутренних напряжений.	При закалке необходимо обеспечить равномерный и более медленный нагрев, использовать закалку с подстуживанием (в двух средах или ступенчатую), отпускать изделия непосредственно после закалки и т.д.
Деформация и коробление	Структурные изменения, происходящие в металле при термической обработке, вызывают изменение объема (деформацию), а неравномерность охлаждения — искажение внешней формы (коробление). Такие дефекты закаленной стали происходят в связи с тем, что структуры имеют различный удельный объем. Это следует учитывать при назначении допуска на шлифовку. Например, удельный объем мартенсита больше, чем удельный объем перлита. Также форма различных деталей под влиянием структурных напряжений изменяется иначе, чем под влиянием термических напряжений.	Для предотвращения деформаций и коробления необходимо обеспечить медленное охлаждение в интервале мартенситного превращения путем ступенчатой и изотермической заклок, закалки.

Рекомендации по устранению технологических дефектов термической обработки позволят повысить надежность и долговечность изделий из конструкционных сталей при эксплуатации.

Список литературы:

1. Повышение прочностных свойств элементов металлоконструкций методами высокоэнергетического упрочнения и термической обработки / В.Н. Ковалевский, П.А. Витязь, А.Ф. Ильющенко, Ю.Г. Алексеев, И.В. Фомихина. – Минск: БНТУ, 2013. – 364 с.
2. Фомихина, И. В. Механизмы деградации структуры конструкционных сталей, методы повышения эксплуатационных свойств изделий из них : дис. ... д-ра техн. наук : 05.16.09 / И. В. Фомихина. – Минск, 2018. – 398 л.
3. Атлас производственных разрушений различных конструкций / А. Ф. Ильющенко, Л. В. Маркова, В. А. Чекан, И. В. Фомихина, В. В. Коледа. – Беларуская навука, 2017. – 312 с.
4. Атлас производственных разрушений различных конструкций из цветных металлов и сплавов / А. Ф. Ильющенко, Л. В. Маркова, В. А. Чекан, И. В. Фомихина, В. В. Коледа. – Беларуская навука, 2022. – 364 с.
5. Fomikhina I. Defects in casting, metal forming, heat treatment and ways to eliminate them at the production stage // Annali d'Italia journal No 49/2023, p. 111-127. DOI: 10.5281/zenodo.10214709.