УДК 621.785:669.14.018

М.М. Ганиев д-р техн. наук, проф**., А.И. Швеёв,** канд. техн, наук, доцент,
В.И. Астащенко д-р техн. наук, **Т.В. Швеёва,** канд. техн, наук
Набережночелнинский институт, филиал ФГАОУ ВПО
«Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия
Тел.: 8 (8552) 58-95-38; E-mail: astvi-52@mail.ru

НЕЙТРАЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ СТАЛИ В МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Представлены металлургические дефекты в стали и их влияние на технологические и механические свойства деталей машин. Приведены технологическиенновационные решения по нейтрализации структурной полосчатости, обезуглероженного слоя, ликвационного квадрата и полосок в стали. Показана положительная роль термической и пластической деформации стали в машиностроении на ударную вязкость и усталостную прочность. Разработан и рекомендован эффективный способ определения обезуглероженного слоя на деталях любой конфигурации. Предложена новая технология термической обработки заготовок.

Ключевые слова: *сталь, металлургические дефекты, ликвация, пластическая деформация, термическая обработка, механические свойства*

Введение.

Машиностроение является основным потребителем продукции металлургических предприятий, и ключевое место в этом занимает сталь, используемая для изготовления деталей различного функционального назначения. В ближайшем будущем сталь останется основным конструкционным материалом в промышленности, и повышение ее потребительских свойств является нестареющей и актуальной задачей. В процессе технологического передела при изготовлении большинства металлоизделий используются стадии пластической деформации, термической, механической и упрочняющей обработки. Свойства таких изделий формируются на всем пути преобразования металла в деталь. Многие металлургические особенности строения и свойств стали очень устойчивы, передаются от этапа к этапу при технологическом металлопеределе, наследуются готовыми изделиями, и, зачастую, снижают физико-механические и технологические свойства сплава. Вступление страны в ВТО требует изготовление конкурентоспособной продукции, отвечающей требованиям европейским и мировым стандартам в части надежности, долговечности, экологичности, удельной грузоподъемности и т.д. Полное использование ресурса свойств в стали – задача актуальная и сложная. Для достижения этой цели особая роль отводится технологическому переделу сплава в машиностроении, а именно технологиям, направленным на ликвидацию или нейтрализацию макро- и микростроения, негативно влияющего на потребительские свойства металлоизделий.

Несмотря на многосторонние исследования сталей, в том числе и сталей с машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), вопросам устойчивости металлургического строения и свойств на этапах технологического передела уделено недостаточное внимание. По этой причине целесообразно проведение дополнительных исследований, ориентированных на изучение химико-структурной неоднородности, микростроения, чистоты сплава и его зернистого строения. Важное практическое

значение имеют данные по влиянию различных технологических параметров на структурообразование и свойства конструкционных сталей при изготовлении тяжелонагруженных деталях автомобиля.

В этой связи актуальной задачей является создание технических и технологических решений по ликвидации или нейтрализации на этапах технологического металопередела дефектов и нежелательных структурно-фазовых и других образований в стали, передаваемых от металлургического производства.

Цель работы - нейтрализация металлургических дефектов стали в результате тепловых и деформационных воздействий при технологическом металлопеределе в машиностроительном производстве.

Основное содержание и результаты работы.

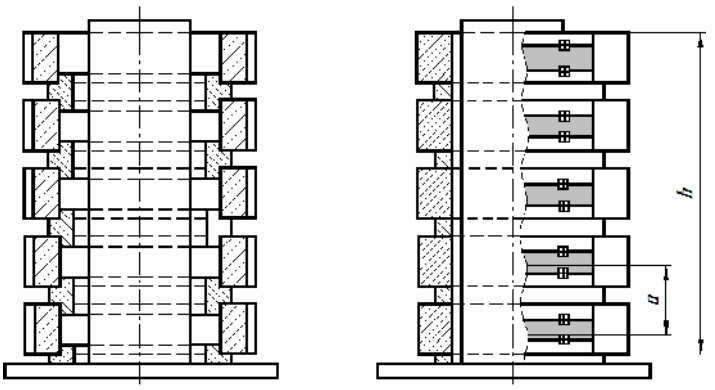
В работе использовались широко применяемые в автомобилестроении цементуемые и улучшаемые конструкционные легированные стали – 20ХГНМТА, 15ХГН2ТА, 18ХГР, 12ХН3А, 40Х, 40ХН2МА и 42ХМФА. Химический состав сталей определяли методом спектроскопии с использованием микрофотометра МФС-51 и спектрографа АФС-51 со специализированным программным обеспечением SBP и Next и приборов АН-7529 и АН-7560 для определения содержания углерода и серы. Металлографические исследования проводили на оптических микроскопах Neophot-2, Эпитип-2 (Германия) и IM-7200 (Япония) с использованием системы «ВидеоТест-М» и программного продукта «Trixomet PRO». Механические свойства определяли после испытания стандартных образцов на растяжение и ударную вязкость. Для измерения твердости применяли приборы ТК-2М, ТШ-2М и ХРО-250, а микротвердости – «Durimet» (Германия). Степень загрязненности стали неметаллическими включениями оценивали по ГОСТ 1778-70, размер зерна определяли методом окисления и цементации по ГОСТ 5639-82, прокаливаемость по ГОСТ 5657-69 методом торцевой закалки стандартного образца. Отбор проб от стального проката для проведения исследований и испытаний проводили по ГОСТ 7564-70. Уровень напряжений в поверхностном слое детали после дробеструйной обработки определяли рентгеновским методом с использованием дифрактометра XRD 3003PTS (Германия), а интенсивность наклепа – по пластинкам Альмена, снятых с приспособления (рис. 1), имитирующего месторасположения деталей в камере дробемета «Понгборн». Макроструктура изучалась на протравленных темплетах в соответствии с ГОСТ 10243. Глубина и степень обезуглероживания стали определялись на установке ТТМС фирмы «Миллипор» (США) с использованием полуавтоматического анализатора изображений при сканировании электронным лучем.

Наиболее распространенными дефектами в стальных изделиях, наследуемыми от металлургического производства, являются неметаллические включения, ликвационные проявления различного вида и обезуглероженный слой. Эти структурные и фазовые особенности оказывают негативное влияние на физико-механические и эксплуатационные свойства металлоизделий.

Известно, что обезуглероживание поверхности деталей снижает их сопротивление усталости, причем тем больше, чем выше прочность материала, степень и глубина обезуглероженного слоя [1,2]. Одним из способов снижения вредного влияния обезуглероживания на выносливость деталей является обработка поверхности дробью, которая осуществляется на специализированном оборудовании.

Одной из ответственных деталей двигателя автомобиля «КАМАЗ» является шатун, изготавливаемый из стали 40ХН2МА. После штамповки заготовок, нагретых в

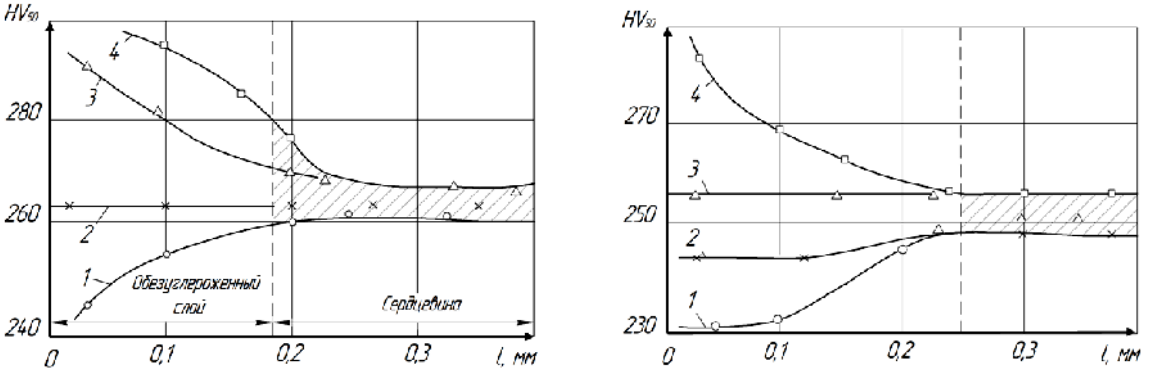
индукторе до температуры 1220±20°С, поковка подвергается температурному улучшению (нагрев до 860°С, закалка в масло и отпуск при 660°С). В процессе высокотемпературных нагревов происходит обезуглероживание поверхности поковки, которое наследуется участками готовой детали, не подвергаемых механической обработке, в частности стеблем, имеющим тавровое сечение. Естественно твердость обезуглероженной поверхности оказывается ниже требуемой техническими условиями (НВ 241-285). Дробеструйная обработка таких деталей позволяет повысить твердость поверхности до требуемого уровня и выше. Так, при обработке стальной дробью, размером 0,9 – 1,5 мм, макротвердость поверхности увеличивается и может превзойти твердость основного металла на HV 30 – 50 и это зависит от времени дробеобработки и глубины обезуглероженного слоя.



а) б)

Рис. 1. Схема расположения деталей (А) и пластин Альмена (Б) в приспособлении, имитирующем укладку деталей:
а – расстояние от центров двух пластинок; h– максимальная высота загружаемых деталей

При толщине обезуглероженного слоя 0,17 мм дробеобработка в течение 10 мин делает твердость поверхности равной твердости сердцевины. Для обезуглероженного слоя 0,25 мм это время составляет порядка 20 мин (рис.2).



а) б)

Рис. 2. Распределение микротвердости по глубине обезуглероженного слоя на поковках после термического улучшения без дробеобработки (кривые 1) и после дробеобработки в течение 10 мин (кривые 2), 20 мин (кривые 3) и 30 мин (кривые 4):

а - глубина обезуглероженного слоя 0,18 мм; б - глубина обезуглероженного слоя 0,25 мм

Обеспечить твердость поверхности шатуна – условие необходимое, но не достаточное. Нужно еще, чтобы операция дробеобработки не сказалась отрицательно на его выносливости. В связи с этим обработанные дробью шатуны были испытаны на гидропульсационной машине (частота нагружения 350 циклов в 1 мин при базе 2 млн циклов, амплитуда нагрузки изменилась от 23 до 120 кН). Результаты исследования (число циклов до разрушения шатуна) приведены в таблице 1.

Таблица 1. Долговечность шатунов

Амплитуда нагрузки, кН	Обезуглероженный слой отсутствует, время обработки 10 мин	Глубина обезуглероженного слоя 0,17 мм		
		без обработки	время обработки 10 мин	время обработки 30 мин
120	70000	60000	40000	60000
95	80000	90000	160000	220000
70	250000	170000	600000	900000

Как видно из таблицы 1, при больших нагрузках влияние как обезуглероживания, так и дробеобработки невелико. Однако при малых нагрузках влияние обоих факторов возрастает: эффективность дробеобработки увеличивается с увеличением ее продолжительности. Например, при амплитуде нагрузки 95кН дробеобработка в течение 10 мин увеличивает долговечность в 1,8 раза, а в течение 30 мин – в 2,5 раза; при амплитуде нагрузки 70 кН долговечность увеличивается соответственно в 3,5 и 5,5 раза.

Повышение долговечности шатунов, прошедших операцию дробеобработки, объясняется не только упрочнением материала вследствие наклепа (увеличение микротвердости), но и вследствие изменения характера и величины остаточных напряжений у поверхности деталей. Так, рентгеноструктурными исследованиями установлено, что после улучшения на поверхности поковок создаются растягивающие напряжения, равные 90-180МПа. После обработки поверхности дробью в течение 10мин появляются сжимающие напряжения величиной 100-120 МПа, а при обработке в течение 30 мин они достигают 300-500 МПа.

Таким образом, в случае достаточного времени дробеобработки (10-30 мин) можно повысить микротвердость поверхностных слоев до уровня микротвердости сердцевины, создать на поверхности сжимающие напряжения порядка 300-500 МПа и повысить долговечность шатуна в 3,5-5,5 раза.

Однако, при таком способе упрочнения возникают затруднения связанные с выбором обоснованных параметров дробеобработки изделий сложной геометрической формы из-за отсутствия достоверной информации о фактической степени и глубине обезуглероженного слоя на таких деталях.

Глубина обезуглероживания обычно определяется металлографическим методом или послойным химическим анализом. Разная глубина слоя, получаемая различными способами, связана с тем, что при металлографическом методе за глубину обезуглероживания принимают расстояние от поверхности до структуры основного металла; при послойном химическом – до соответствия его марочному составу.

Проведение послойного химического анализа на содержание углерода имеет ограничение и возможно только на цилиндрических или плоских образцах.

Нами разработан и предложен экспрессный метод количественного определения содержания углерода в обезуглероженном слое стальных деталей любой формы. Метод основан на определении содержания перлита (%П) и феррита (%Ф) в структуре отожженной стали. Содержание углерода определяется по известной формуле ($\%C - \frac{0{,}8 \cdot \%П}{100}$). С помощью автоматического регистрирующего счетчика установки ТТМС определялась площадь, занимаемая на шлифе темной структурной составляющей. Площадь занимаемая перлитом определилась как разность площадей занимаемой темной структурной составляющей на травленном шлифе (перлит и неметаллические включения) и на нетравленом шлифе (неметаллические включения). Исследованию подвергались углеродистые стали – Сталь 10, Сталь 20, Сталь 35, Сталь 45 и У7, содержание углерода в которых определяли методом химического анализа и предлагаемым способом.

Используя приведенную методику можно определять содержание углерода в обезуглероженном слое на любом расстоянии от поверхности образца и, соответственно, установить глубину обезуглероживания с точностью 0,005 мм. Погрешность измерения степени обезуглероживания снижается с увеличением содержания углерода в стали и не превышает 2% (рис. 3).

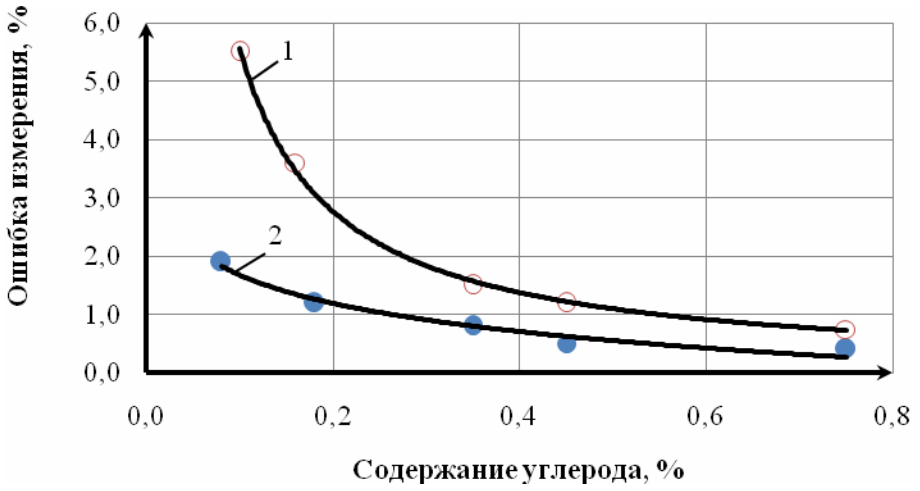


Рис. 3. Погрешность измерения в зависимости от содержания углерода в стали: 1 – без учета неметаллических включений; 2 – с учетом

Базируясь на полученных результатах исследования, можно с успехом нейтрализовать негативное действие обезуглероженного слоя, а путем оптимизации длительности процесса дробеобработки изделий добиться высокой долговечности деталей, работающих в условиях знакопеременных циклических нагрузок.

Из часто встречающихся структурных несовершенств в металлоизделиях особое внимание должно уделиться ликвационным проявлением – полоскам, квадрату, полосчатости и другим признакам (рис. 4, рис. 5). Эти неоднородности служат

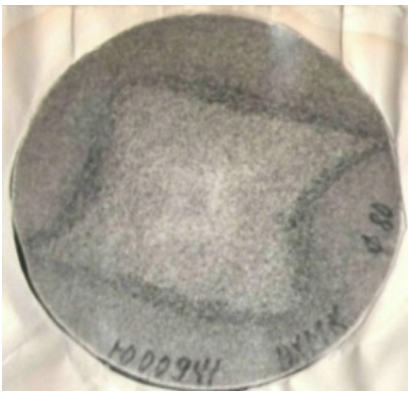


Рис. 4. Выход ликвационного квадрата к поверхности изделия

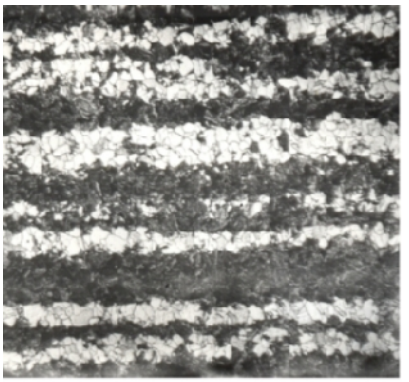


Рис. 5. «Строчечная» структурная неоднородность в стали

причиной трещинообразования при закалке (рис. 6), преждевременного выхода из строя деталей (рис. 7), плохой обрабатываемости резанием и давлением и т.д.

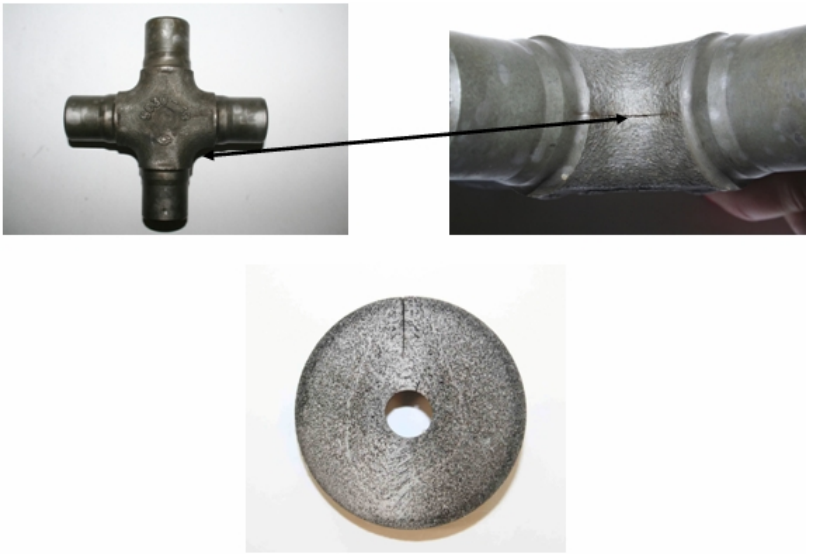


Рис. 6. Ликвационный квадрат и обусловленная им трещина в детали

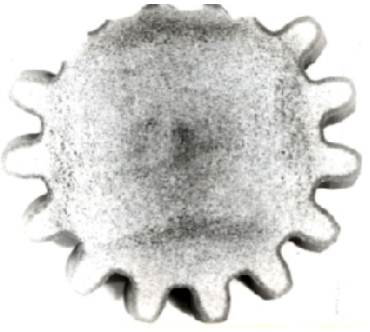


Рис. 7. Ликвационный квадрат у основания зуба шестерни

В отношении феррито-перлитной полосчатости (рис. 5) в заготовках имеются неоспоримые доказательства о снижении их обрабатываемости на операциях механической обработки: уменьшается стойкость режущего инструмента, ухудшается стружкообразование, возникает наклеп на обрабатываемой поверхности и кроме того повышается деформация и коробление деталей в процессе химико-термической обработки.

Выявлено, что структурную полосчатость с успехом можно ликвидировать на этапе термической обработки поковок. Для обработки резанием стальных поковок наилучшие показатели свойств отдельных структурных составляющих достигаются при изотермическом отжиге. Авторами разработан и реализован в производстве ОАО КАМАЗ эффективный способ термической обработки [3]: после аустенитизации при температуре Ac_3 + (100-150°С) поковки подвергаются ускоренному охлаждению до температуры максимальной скорости диффузионного распада аустенита (~680°С) с последующими изотермическими выдержками при температурах со ступенчатым ее понижении по схеме 680 – 660 – 640 – 600°С. Обязательным условием на этапе подстуживания является придание регламентированной скорости охлаждения (не менее 23°С/мин) поковок, в противном случае феррито-перлитная полосчатость сохраняется и негативно сказывается на последующих операциях технологического металлопередела.

Используя неоднократно-прерывистое охлаждение на этапе подстуживания и диффузионный распад аустенита при различных температурах, обеспечивается получение однородного структурного состояния по сечению поковок, твердости в пределах 156-207 НВ, микротвердости перлита от 196HV до 350HV и феррита от 143HV до 210HV при разности менее 80HV между этими составляющими.

Ликвационный квадрат в стальных полуфабрикатах является следствием низкой скорости охлаждения стали при её кристаллизации. Этот дефект неизбежен в металлоизделиях, если в металлургии осуществляется литье в изложницы с получением стального слитка [4]. Сконцентрированность в таких зонах окислов, сульфидов и других соединений служит причиной образования закалочных трещин и условием неравнопрочности изделий. Поэтому первостепенной задачей машиностроительных технологий является нейтрализация ликвационного квадрата стали путем его удаления при механической обработке полуфабрикатов или смещения в нерабочие зоны детали. В настоящее время при ОМД используются программные продукты типа Q-форм, которые позволяют прогнозировать перемещения металла при его пластической деформации в штампе. На основе этой информации выполняется грамотное проектирование штамповой оснастки, создаются эффективные технологии штамповки и ковки заготовок направленные на формирование благоприятной текстуры деформации и обеспечивается нейтрализация негативного ликвационного проявления.

Одним из достижений в области металлургического производства полуфабрикатов, несомненно, является непрерывная разливка стали [5]. Наряду с высокой производительностью, высоким показателем выхода годного металла исключается и ликвационный квадрат в металлопродукции за счет высокой скорости кристаллизации сплава при изготовлении заготовок на машинах непрерывного литья. Прокат, полученный из таких заготовок, имеет существенно меньшую степень обжатия нежели произведенный из слитка. Поэтому для такого металлопроката нередки случаи присутствия пористости и ликвационных полос, которые существенно снижают механические свойства стали и, особенно, пластичность и ударную вязкость при пониженных температурах (таблица 2 и 3).

Пластическая деформация стали 40Х с МНЛЗ при степени деформации металла 97,4% позволяет нейтрализовать эти полоски и положительно сказывается на показателях ударной вязкости, которая приближается к значениям для стали традиционного способа производства «слиток-блюм-сортовой стан» (табл. 3).

Таблица 2. Дисперсия свойств стали 40Х в прокате Ø95 мм

Место отбора проб	Показатели механических свойств			
	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	ε, %	Ψ, %
«Чистая» зона	780	610	16	63
«Загрязненная» зона	770	600	11	42
Сердцевина	780	610	10	32

Таблица 3. Ударная вязкость стали 40Х различного способа производства

Технология производства проката Ø 95 мм		Ударная вязкость () при температуре, ºС				
		+20	-20	-40	-60	-80
Традиционная (из слитка)		15,2	14,7	11,8	8,4	8,0
Из заготовок с МНЛЗ и дополнительной деформацией (%)	0	13,2	9,8	9,5	7,5	6,5
	25	14,0	11,4	9,4	8,2	7,6
	50	16,0	13,9	10,7	8,6	8,3

Присутствие ликвационных полосок размером до 0,15R в прокате, характерных для стали с МНЛЗ, снижает показатели пластичности на 50 – 80% и долговечность деталей более чем в 3 раза. Установлено, что пластическая деформация такого металла со степенью 87,5% (соответствует восьмикратной величине вытяжки при прокатке), обеспечивает локализацию ликвата и существенно повышает показатель долговечности деталей (рис.8).

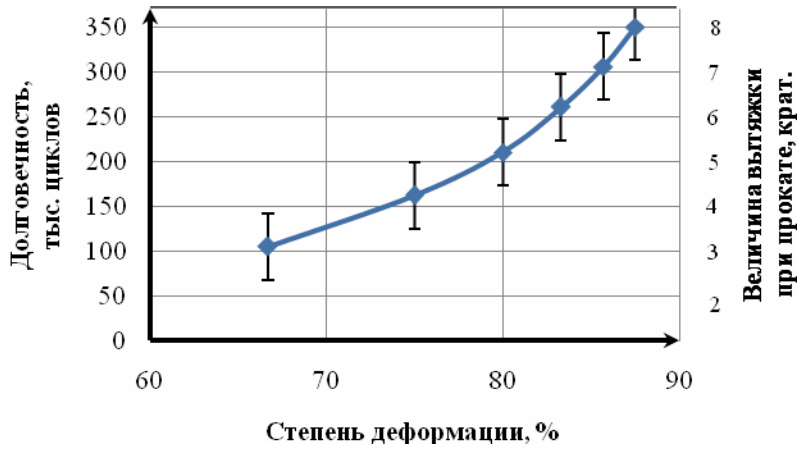


Рис. 8. Связь степени деформации стали, имеющей ликвационные полоски, с показателем долговечности детали

Заключение.

1. Показаны наиболее часто встречающиеся в металлоизделиях дефекты металлургического характера и методы их нейтрализации или ликвидации на этапах технологического передела стали в машиностроении.

2. Негативное действие обезуглероженного слоя нейтрализуется дробеструйной обработкой деталей, параметры которой выбираются исходя из глубины поверхностного структурного дефекта.

3. Полосчатость феррито-перлитной структуры ликвидируется при изотермическом отжиге поковок на стадии подстуживания изделий в интервале температур от Ac_3 + (100-150)°С до Ac_1 - (20-40)°С со скоростью более 23°С/мин.

4. Ликвационный квадрат в металлоизделиях наследуется от металлургии и может быть нейтрализован путем перемещения при пластической деформации в нагруженные при эксплуатации зоны изделия.

5. Ликвационные полоски в стали снижают механические свойства сплава и в тем большей степени, чем ниже величина пластической деформации. Высокие показатели свойств стали достигаются при пластической деформации металла превышающей 97%.

Список литературы:

1. Глинер, Р.Е. Технология поверхностного упрочнения металлов термической и пластической обработкой: учеб. пособие для студентов вузов/ Р.Е. Глинер. – Нижний Новгород: НГТУ, 2008. – 249 с.

2. Саверин, М.М. Дробеструйный наклёп. / М.М. Саверин. –М.: Машгиз, 1955. - 312с.

3. Патент 1534067 РФ, МКИ С21Д 1/26 Способ термической обработки заготовок. Авторы Астащенко В.И. и др. Опубл. 07.01.90, бюл. №1, с. 102.

4. Воскобойников, В.Г. Общая металлургия./ В.Г. Воскобойников, В.А. Кудрин, А.М. Якушев. - М.: Металлургия, 1979. - 488с.

5. Смирнов, А.Н. Непрерывная разливка стали. Учебник для вузов./ А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, Е.В. Штепан. - Донецк: ДонНТУ, 2011. - 482с.

M.M. Ganiev, A.I. Shveyov, V.I. Astashchenko, T.V. Shveyova

NEUTRALIZATION OF METALLURGICAL DEFECTS OF STEEL IN MACHINE-BUILDING PRODUCTION

Metallurgical defects in steel and their influence on technological and mechanical properties of details of cars are presented. Tekhnologicheskiy ennovatsionny decisions on neutralization of the structural poloschatost, the decarbonized layer, likvatsionny square and strips are provided in steel. The positive role of thermal and plastic deformation of steel in mechanical engineering on the impact strength and fatigue strength is shown. The effective mode of definition of the decarbonized layer on details of any configuration is developed and recommended. The new technology of heat treatment of preparations is offered.

Keywords: *steel, metallurgical defects, likvation, plastic deformation, heat treatment, mechanical properties.*

М.М. Ганієв, О.І.Швейов, В.І.Астащенко, Т.В.Швейова

НЕЙТРАЛІЗАЦІЯ МЕТАЛУРГІЙНИХ ДЕФЕКТІВ СТАЛІ У МАШИНОБУДІВНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Представлені металургійні дефекти в сталі та їх вплив на технологічні і механічні властивості деталей машин. Наведено технологічні іноваційні рішення з нейтралізації структурної смужчатості, зневуглецьованого шару, ліквационних квадрата і смужок у сталі. Показана позитивна роль термічної та пластичної деформації сталі в машинобудуванні на ударну в'язкість і втомну міцність. Розроблено та рекомендовано ефективний спосіб визначення зневуглецьованого шару на деталях будь-якої конфігурації. Запропоновано нову технологію термічної обробки заготовок.

Ключові слова: *сталь, металургійні дефекти, ліквація, пластична деформація, термічна обробка, механічні властивості*

Надійшла до редколегії 15.05.2013 р.