

УДК 620.172.224.2

ПРОЧНОСТЬ, УДАРНАЯ ВЯЗКОСТЬ И МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКИ ОБРАБОТАННОЙ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ ПРИ 213 К

© 2015 Н.Д. Петрова, А.С. Сыромятникова, А.М. Иванов

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН,
г. Якутск

Поступила в редакцию 26.03.2015

Определена ударная вязкость при температуре 213 К и проведено исследование механизма разрушения низколегированной стали 09Г2С при низкой температуре в зависимости от вида обработки и их сочетания. Проведено сравнение значений микротвердости и прочности обработанной разными способами стали. Показано, что равноканальное угловое прессование предварительно закаленной и отпущенной стали 09Г2С обеспечивает более высокие значения предела прочности, микротвердости и ударной вязкости, чем просто после равноканального углового прессования.

Ключевые слова: *сталь, закалка, отпуск, температура, равноканальное угловое прессование, микротвердость, прочность, разрушение, ударная вязкость, трещина, фрактограмма*

Как известно, для достижения определенного уровня механических свойств материалов используется сочетание методов термической и механической обработки. Термическая обработка (отжиг, закалка и другие) используется как самостоятельный, так и дополнительный к механической метод обработки. Равноканальное угловое прессование (РКУП) – один из методов интенсивной пластической деформации – является способом повышения упругих свойств, приводящей к повышению прочностных свойств металлических материалов. В результате термомеханической обработки (ТМО) изменяются структура, твердость, прочность, пластичность, ударная вязкость и т.д.

Большие успехи в развитии теории и практическом применении термомеханической обработки металлов были достигнуты отечественными научными коллективами В.Д. Садовского, М.Л. Бернштейна, А.П. Гуляева, В.С. Ивановой и других [1-5]. ТМО направлена на улучшение физико-механических свойств металлических материалов. В результате меняются различные характеристики материала: структура, микротвердость, прочность, пластичность, ударная вязкость и др. Механизмы вязкого и хрупкого

разрушения металлов и их сплавов рассмотрены во многих работах [6, 7 и др.]. В последнее время в связи с развитием методов интенсивной пластической деформации [8, 9], встает вопрос о всестороннем изучении свойств металлов и сплавов с субмикро- и нанокристаллической структурой, в том числе и при низких температурах. Для эффективного управления структурой и свойствами материалов используются комбинированные методы обработки [10, 11 и др.].

Недостаточно изучены механизмы деформирования и разрушения материалов с субмикро- и нанокристаллической структурой при статическом, динамическом и циклическом нагружении в условиях низких температур. В [12] установлено повышение ударной вязкости низколегированной стали 09Г2С при температуре испытаний 233 К в 11,5 раз после нагрева при 773 К в течение 5 часов образцов, подвергнутых РКУП в два прохода, по сравнению с состоянием после РКУП. Результаты исследований в [13] показывают, что РКУП с формированием СМК структуры сужает интервал вязко-хрупкого перехода, не изменяя порога хладноломкости стали 10. При этом доминирующими механизмами низкотемпературного разрушения образцов из стали 10 в исходном состоянии является микроскол, а после 4 и 6 проходов РКУП – квазискол. В интервале вязко-хрупкого перехода сталь 10 в исходном состоянии разрушается вязко-хрупко (микроскол и ямочный микрорельеф), а после РКУП – с образованием вязких гребней и ступенек (4 прохода РКУП) или малорельефных вытянутых участков (6 проходов РКУП). При температуре испытания 213 К значения ударной

Петрова Нюргяна Дмитриевна, младший научный сотрудник. E-mail: nakalykay@mail.ru

Сыромятникова Айталина Степановна, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник. E-mail: sas@iptpn.yasn.ru

Иванов Афанасий Михайлович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник. E-mail: a.m.ivanov@iptpn.yasn.ru

вязкости стали 10 в исходном состоянии и после РКУП в 4 и 6 проходов практически одинаковы и составляют примерно $KCV=0,24$ МДж·м⁻².

Ряд работ посвящен исследованию титана разного класса. Значительное повышение прочности, снижение пластичности и сужение температурного интервала повышения ударной вязкости при высоких температурах формированием субмикроструктурной (СМК) структуры в титане класса Grade 4 методом РКУП по конформ-схеме (РКУП-конформ) отмечается в [10]. Ударная вязкость титана Grade 4 при 213 К в исходном состоянии составила $KCV=0,23$ МДж·м⁻², а после РКУП-конформ $KCV=0,1$ МДж·м⁻². Предполагается, что сужение температурного интервала увеличения ударной вязкости – общая закономерность для материалов с ОЦК и ГПУ-структурой в субмикроструктурном состоянии. В этой же работе достигнуто повышение пластичности и ударной вязкости титанового сплава ВТ6, подвергнутого комбинированной обработке РКУ-прессованием, экструзией и изотермической штамповкой. В [14] отмечается, что варьирование режимами РКУП и термообработки дает возможность управлять не только прочностными, пластическими свойствами материала, но и свойствами, характеризующими сопротивление хрупкому разрушению, в том числе хладостойкостью. В [15] рассмотрен титан Grade 2 в исходном состоянии; после отжига в течение 2-х часов при температуре $T=983$ К и РКУП в 4 прохода по маршруту B_c при $T=573$ К; после отжига, РКУП и прокатки при 300 К и 170 К. Установлено, что ИПД в виде РКУП и сочетания РКУП с прокаткой повышает энергию удара для разрушения образцов.

Цель работы: исследование механизма разрушения низколегированной стали при низкой температуре в зависимости от вида обработки и их сочетания.

Методика исследования. Объект исследования – низколегированная сталь 09Г2С в состоянии поставки; после закалки; после РКУП; после закалки и отпуска; после закалки, отпуска и РКУП. Химический состав стали 09Г2С: 0,1% С, 0,85% Si, 1,41% Mn, 0,17% Cr, 0,18% Ni, 0,35% Cu, остальное – Fe. Химический анализ проведен на атомно-эмиссионном спектрометре «Foundry-Master» фирмы «Worldwide Analytical Systems AG (WAS AG)». Режимы обработки представлены в табл. 1. При закалке и отпуске нагрев заготовок производился в муфельной печи «Nabertherm». Закалка заготовок осуществлялась в воде с температуры 1203 К, а отпуск выполнялся при температуре 473 К. РКУ-прессование осуществлялось с помощью технологического оборудования на базе гидравлического пресса «ПСУ 125» типа ЗИМ усилием 1250 кН и оснастки с углом пересечения каналов

прессования 120° по маршруту B_c в $n=2$ прохода при температуре $T=673$ К.

Измерения микротвердости проводили методом Виккерса на микротвердомере LM-700 при нагрузке 0,1 Н и времени выдержки 15 с. Значения микротвердости рассчитывали по известной формуле. Характеристики прочности определяли из испытаний на одноосное растяжение с помощью испытательной машины «UTS-20k» при температуре 213 К. Испытания на ударный изгиб образцов Шарпи проводили на маятниковом копре «Amsler RKP-450» при температуре 213 К. Исследование изломов разрушенных образцов Шарпи проводилось с использованием макросъемки и растрового электронного микроскопа JEOL JSM-7800F в режиме вторичных электронов.

Экспериментальные результаты и обсуждение. Как видно из таблицы 1, по сравнению с исходным состоянием все использованные обработки приводят к повышению микротвердости и прочности. РКУП обеспечивает более высокие значения этих характеристик, чем закалка. Но при этом значение ударной вязкости стали после закалки превосходит значения этой характеристики в исходном состоянии ($KCV=0,32$ МДж·м⁻²) и после РКУП. РКУП снижает ударную вязкость по сравнению с исходным состоянием. Последующий после закалки отпуск значительно повышает ударную вязкость стали ($KCV=1,29$ МДж·м⁻²). Микротвердость и предел прочности при этом снижаются, но выше, чем при исходном состоянии, тогда как предел текучести на уровне исходного состояния. Комбинация закалки, отпуска и РКУП приводит к самым высоким значениям микротвердости и предела прочности из всех рассмотренных случаев. Закалка и отпуск перед РКУП (позиция 5 в табл. 1) практически не повлияли на изменение предела текучести (поз. 3). Видно, что при значительном увеличении значений микротвердости и прочности значение ударной вязкости практически осталось на уровне исходного материала.

Рассмотрим фрактограммы разрушенных ударным изгибом при 213 К образцов из стали 09Г2С.

Состояние поставки. Макрорельеф разрушения при ударном нагружении образцов с V-образным надрезом из стали 09Г2С в состоянии поставки при 213 К ($KCV=0,32$ МДж·м⁻²) показывает наличие достаточно протяженной матовой зоны в вершине надреза с выраженной рельефностью и значительной утяжки по толщине образца в устье надреза (рис. 1а), свидетельствующих о вязком характере зарождения трещины и высоком значении работы удара, затраченной на зарождение трещины.

Таблица 1. Характеристики стали 09Г2С в различных состояниях

№	Состояние материала	HV, ГПа	213 К		
			KCV, МДж·м ⁻²	σ_B , МПа	σ_T , МПа
1	исходное – состояние поставки	1,97	0,32	544	389
2	закалка в воде с 1203 К	2,65	0,89	762	494
3	РКУП по маршруту B_c в $n=2$ прохода при температуре $T=673$ К	2,8	0,15	828	725

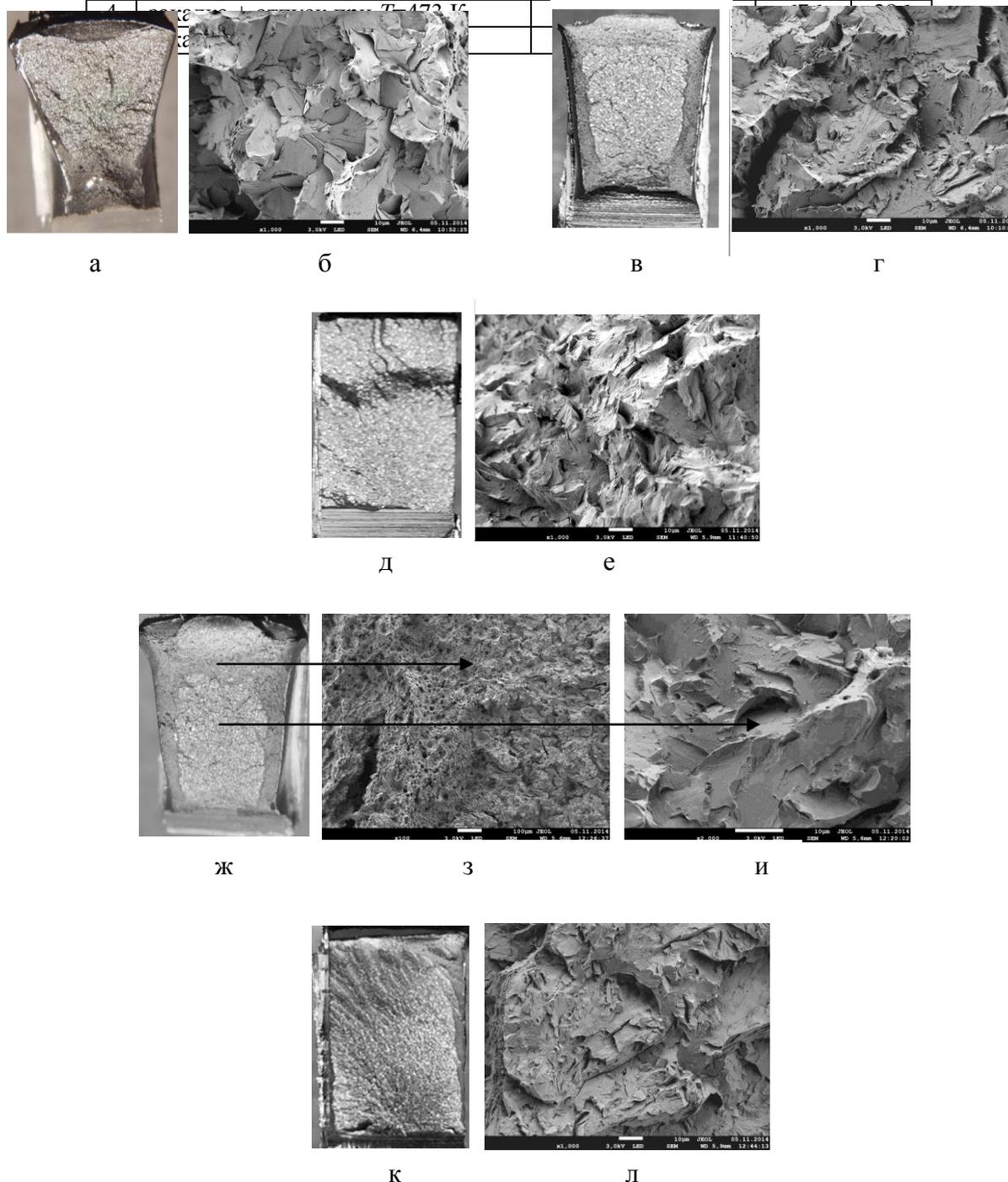


Рис. 1. Макро- и микрорельеф изломов образцов из стали 09Г2С в состоянии поставки (а, б); подвергнутых: закалке в воде от температуры 1203 К (в, г); РКУП в $n=2$ прохода по маршруту B_c при температуре 673 К (д, е); закалке и отпуску при 473 К (ж, з, и); закалке, отпуску и РКУП (к, л)

Основную часть поверхности разрушения, около 80% площади, занимает зона хрупкого разрушения, в которой обнаруживаются такие детали микрорельефа, как фасетки скола, язычки,

ручьистый узор, которые являются типичными для механизма внутризеренного скола (рис. 1б). Средний размер фасеток скола, соответствующий величине ферритных зерен, составляет порядка 15-20 мкм. Однородность поверхности излома свидетельствует о стабильном развитии хрупкой трещины.

Закалка. В результате закалки ударная вязкость по сравнению с исходным состоянием повысилась в 2,8 раз ($KCV=0,89 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}$). Доля зоны хрупкого разрушения сколом уменьшилась и составляет примерно 45 % (рис. 1в). Зона зарождения и развития хрупкого разрушения занимает центральную часть поверхности разрушения образца, в то время как вокруг неё располагаются области развития вязкой трещины от вершины надреза и разрушения срезом в результате образования и развития зоны сдвига. Микрофрактографический анализ показал, что поверхность изломов состоит из ступенчатого микрорельефа, образовавшегося путем квазискола (рис. 1г).

РКУП. РКУ-прессование в $n=2$ прохода привело к снижению ударной вязкости до $KCV=0,15 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}$, что является самым низким показателем для рассмотренных случаев. Область хрупкого разрушения занимает практически всю поверхность разрушения образца (рис. 1д). Ударные изломы светлые, макрохрупкие (рис. 1д). Их поверхность расположена под углом примерно 45° к оси, направленной по линии продолжения надреза. На расстоянии $\sim 2/3$ длины трещины наблюдается изменение траектории её движения. Поверхность излома сформирована веерообразно расположенными гребнями, образованными, по-видимому, в результате расслоения металла.

Поверхность разрушения сформирована по механизму внутризеренного скола, характеризуется более выраженной рельефностью по сравнению с изломом стали в состоянии поставки, что обусловлено измельчением и разориентировкой структурных составляющих, средний размер фасеток скола составляет порядка 10 мкм (рис. 1е).

Закалка + отпуск. Отпуск закаленной стали привел к росту значения ударной вязкости ($KCV=1,29 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}$). Поверхность разрушения образца после обработки по режиму «закалка + отпуск» характеризуется как хрупким (центральная часть излома), так и вязким составляющими в области губ среза (рис. 1ж). Зона долома занимает значительную часть поверхности разрушения образца. Микрорельеф центральной части изломов состоит из микроскола, в зоне долома наблюдается вязкий механизм разрушения с ямочным микрорельефом (рис. 1з).

Закалка + отпуск + РКУП. В результате РКУ-прессования закаленной и отпущенной

стали значение ударной вязкости ($KCV=0,32 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}$) практически сравнялось с этой характеристикой в состоянии поставки. То есть, при почти двукратном повышении прочности стали 09Г2С по этому режиму при 213 К уровень ударной вязкости сохраняется. Сохранение уровня ударной вязкости при 233 К для стали 09Г2С, подвергнутой холодному РКУ-прессованию и РКУП с отжигом, на уровне исходного состояния отмечается и в [16]. Поверхность излома светлая, макрохрупкая и расположена под углом примерно 25° к линии продолжения надреза (рис. 1к). Гребни отрыва, радиально исходящие от центральной части вершины надреза, вначале неглубокие, затем на второй половине излома становятся более глубокими. Микрофрактографический анализ показал, что поверхность изломов состоит из ступенчатого микрорельефа, образовавшегося путем квазискола с вытянутыми малорельефными участками, на гребнях ступенек наблюдается ямочный рельеф, свидетельствующий о вязком механизме при отрыве (рис. 1л).

Выводы:

1. При рассмотренных случаях обработки наилучшие показатели по прочностным свойствам и микротвердости достигнуты при обработке РКУ-прессованием и комбинированной обработке закалкой с отпуском и РКУ-прессованием. Эти виды термопластической обработки в 1,6-1,8 раза повышают прочностные характеристики (предел прочности и предел текучести) и в 1,5 раза микротвердость низколегированной стали 09Г2С. Установлено, что эти виды обработки стали при значительном повышении прочности не обеспечивают увеличение параметров сопротивления разрушению по сравнению с состоянием поставки, что, вероятно, объясняется формированием расслоенной в объеме структуры при прессовании.

2. Наибольшее повышение параметров сопротивления хрупкому разрушению стали по сравнению с исходным состоянием обеспечивает термообработка в виде закалки с последующим отпуском. Ударная вязкость стали 09Г2С после указанной термообработки повышается почти в 4 раза. При этом прочностные свойства и микротвердость металла незначительно, в 1,2 раза, повышаются по сравнению со значениями для металла в состоянии поставки.

3. Изменение ударной вязкости стали 09Г2С связано со сменой механизма разрушения. Основным механизмом разрушения стали 09Г2С в исходном состоянии при низкотемпературном ударном испытании является внутризеренный скол. Изломы ударных образцов стали после закалки и закалки с отпуском характеризуются образованием сосредоточенных областей хрупкого и вязкого разрушений с микрорельефами, соответственно, в виде микроскола и ямочного рельефа. Изломы образцов, подвергнутых

РКУП, содержат расположенные вдоль траектории распространения трещины гребни, образованные, по-видимому, в результате расслоения металла. Образцы после обработки РКУП разрушаются хрупко, при этом хрупкое разрушение образцов без термообработки происходит по механизму внутризеренного скола, после термопластической обработки – по механизму квазискола с образованием ямочного рельефа на гребнях отрыва.

Результаты исследования могут быть использованы при разработке технологий для управления механическими свойствами и хладостойкостью конструкционных сталей.

Работа выполнена в рамках проекта по Программе Президиума РАН (2015).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Иванова, В.С.* Новые пути повышения прочности металлов / *В.С. Иванова, Л.К. Гордиенко* – М.: Наука, 1964. 118 с.
2. *Бернштейн, М.Л.* Термомеханическая обработка металлов и сплавов. Т. 1. – М.: Металлургия, 1968. 596 с.
3. *Бернштейн, М.Л.* Прочность стали. – М.: Металлургия, 1974. 199 с.
4. *Гуляев, А.П.* Структурные изменения при термомеханической обработке стали и их влияние на механические свойства // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1965. № 11. С. 9-17.
5. *Григорьев, А.К.* Термомеханическое упрочнение стали в заготовительном производстве / *А.К. Григорьев, Г.Е. Коджастиров* – М.: Машиностроение, ЛО., 1985. 143 с.
6. *Ботвина, Л.Р.* Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. – М.: Наука, 2008. 334 с.
7. *Золоторевский, В.С.* Механические свойства металлов: Учебник для вузов. 2-е изд. – М.: Металлургия, 1983. 352 с.
8. *Сегал, В.М.* Процессы пластического структурообразования металлов / *В.М. Сегал, В.И. Резников, В.И. Копылов* и др. – Минск: Наука і тэхніка, 1994. 398 с.
9. *Валиев, Р.З.* Объемные наноструктурные металлургические материалы: получение, структура и свойства / *Р.З. Валиев, И.В. Александров* – М.: Академкнига. 2007. 272 с.
10. *Валиев, Р.З.* Прочность и механизм ударного разрушения титана и его сплавов в исходном и субмикроструктурном состояниях / *Р.З. Валиев, Г.В. Клевцов, И.П. Семенова* и др. // *Деформация и разрушение материалов*. 2012. №11. С. 32-37.
11. *Иванов, А.М.* Эффективность комбинирования термопластических методов обработки сталей // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2012. №2-4 (292). С. 25-33.
12. *Добаткин, С.В.* Механические свойства субмикроструктурной стали 09Г2С после РКУ пресования / *С.В. Добаткин, П.Д. Одесский, О.И. Слепцов* и др. // I Всероссийская конференция по наноматериалам «НАНО-2007». Тезисы докладов. – М., 2004. С. 143.
13. *Клевцов, Г.В.* Механизм ударного разрушения стали 10 с субмикроструктурной структурой в интервале вязко-хрупкого перехода / *Г.В. Клевцов, Р.З. Валиев, Г.И. Рааб* и др. // *Деформация и разрушение материалов*. 2011. №8. С. 9-13.
14. *Иванов, А.М.* Упрочнение интенсивной пластической деформацией и разрушение конструкционной стали / *А.М. Иванов, А.С. Сыромьятникова, Н.Д. Петрова* // *Упрочняющие технологии покрытия*. 2012. №3. С. 39-42.
15. *Mendes, A.* How severe plastic deformation at cryogenic temperature affects strength, fatigue, and impact behaviour of grade 2 Titanium / *A. Mendes, A.M. Kliaugaa, M. Ferrantea, V.L. Sordi* // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2014. Vol. 63. 012161. 9 p. (<http://iopscience.iop.org/1757-899X/63/1/012161>).
16. *Яковлева, С.П.* Механические свойства стали 09Г2С при низкотемпературном отжиге после холодного равноканального углового пресования / *С.П. Яковлева, С.Н. Махарова* // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2010. Т. 12. №1(2). С. 589-591.

STRENGTH, IMPACT TOUGHNESS AND FRACTURE MECHANISM OF THERMOPLASTIC PROCESSED LOW-ALLOY STEEL AT 213 K

© 2015 N.D. Petrova, A.S. Syromyatnikova, A.M. Ivanov

Institute of Physical and Technical Problems of the North named after V.P. Larionov
SB RAS, Yakutsk

A determination of impact toughness at temperatures 213 K and investigation mechanism of fracture 09G2S low alloyed steel at low temperature depending on the type of treatment, and combinations thereof was carried out. A comparison of the values of microhardness and strength of steel processed various ways was done. It is shown that the equal-channel angular pressing (ECAP) pre-hardened and tempered steel 09G2S provides higher values of tensile strength, microhardness and toughness than just after ECAP.

Keywords: steel, quenching, tempering, temperature, equal-channel angular pressing, micro-hardness, strength, fracture, impact toughness, crack, fractogram.

Nyurguyana Petrova, Minor Research Fellow. E-mail: nakalykay@mail.ru; Aytalina Syromyatnikova, Candidate of Physics and Mathematics Seading Research Fellow. E-mail: sas@iptpn.ysn.ru; Afanasiy Ivanov, Candidate of Technical Sciences, Leading Research Fellow. E-mail: a.m.ivanov@iptpn.ysn.ru