

УДК 620.172.224.2

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ ИСПЫТАНИЯ

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

*ФГБУН «Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова»  
Сибирского отделения РАН, Якутск, e-mail: a.m.ivanov@iptpn.ysn.ru*

Цель работы: рассмотрение возможностей комбинированных методов обработки в задачах повышения прочности и ударной вязкости и исследование механизма разрушения стали в зависимости от структурного состояния и понижения температуры. Проведено исследование механических свойств низколегированной стали 09Г2С, подвергнутой термопластической обработке в различных режимах: ковке в три цикла с началом и окончанием процесса при 1173 и 1023 К, соответственно, равноканальному угловому прессованию в четыре прохода по маршруту  $B_c$  при температуре 673 К и их комбинации. Определена ударная вязкость при температуре 213 К и дано описание механизма разрушения ударных образцов стали в различных состояниях. Установлено, что комбинированная обработка обеспечивает высокую прочность и более высокие показатели ударной вязкости и сопротивления материала распространению хрупкой трещины по сравнению с исходным состоянием.

**Ключевые слова:** сталь, образец, микроструктура, зерно, прочность, пластичность, деформация, ковка, равноканальное угловое прессование, температура, ударная вязкость, излом, фрактограмма, вязкое и хрупкое разрушения

## INFLUENCE OF MODES OF THERMOPLASTIC TREATMENT ON MECHANICAL PROPERTIES AND FRACTURE MECHANISM OF LOW-ALLOY STEELS AT LOW TEMPERATURES TEST

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

*V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North Russian Academy  
of Sciences, Siberian Branch, Yakutsk, e-mail: nakalykay@mail.ru*

Objective: The opportunities of combined treatment methods in problems of increased strength, toughness and investigation of the mechanism of fracture of steel depending on the structural condition and lowering the temperature. The study of mechanical properties of low-alloy steel 09G2S subjected to thermoplastic processing in different modes: forging in three cycles with the beginning and end of the process at 1173 and 1023 K, respectively; equal channel angular pressing in four passes on the route of the  $B_c$  at a temperature of 673 K and their combinations. Impact toughness at a temperature of 213 K is determined and the mechanisms of destruction of the samples of steel drums in various states are described. Found that combined treatment provides higher strength and higher toughness and resistance of a material to the distribution of brittle cracks in comparison with the initial state.

**Keywords:** steel, specimen microstructure, grain, strength, ductility, deformation, forging, equal channel angular pressing, temperature, toughness, fracture, fraktogram, viscous and brittle fracture

Создание новых и улучшение физико-механических свойств существующих материалов требует разработки новых методов и технологий обработки, изучения механизма деформирования и разрушения и т.д.

Механизмы вязкого и хрупкого разрушения металлов и их сплавов проанализированы и описаны во многих работах [1, 3 и др.]. Методы интенсивной пластической деформации, получившие широкое применение в последнее время и имеющие широкие перспективы в будущем, обеспечивают достижение уникальных физико-механических свойств металлических материалов [2, 7]. Определенные преимущества и перспективы имеют комбинированные методы интенсивной пластической деформации [4–6]. В имеющихся работах доста-

точно широко освещены вопросы изучения структуры, микротвердости, прочностных характеристик, пластичности, ударной вязкости и др. Но, тем не менее, еще недостаточно исследованы механизмы деформирования и разрушения металлов и сплавов с ультрамелкозернистой структурой, в том числе в условиях низких температур. Поэтому разработка новых и развитие существующих методов обработки материалов, в том числе комбинированных, исследование механизма разрушения сталей в различных состояниях имеют научное и прикладное значение.

**Целью работы** является рассмотрение возможностей комбинированных методов обработки в задачах повышения прочности и ударной вязкости и исследование меха-

низма разрушения стали в зависимости от структурного состояния и понижения температуры.

### Материал и методика исследований

Объект исследования – конструкционная низколегированная сталь 09Г2С в состоянии поставки, послековки, после термомеханической обработки по схеме «ковка + равноканальное угловое прессование». 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)».

Схема комбинированной термопластической обработки заготовки представляет собой последовательное применениековки и равноканального углового прессования (РКУП). Режимы обработки представлены в табл. 1.

Нагрев заготовки осуществлялся в муфельной печи «Nabertherm», а всесторонняя ковка с помощью пневматического молота МА4129А. Варьировалась температура началаковки и скорость охлаждения послековки. 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  $n = 4$  прохода при температуре  $T = 673$  К с разной скоростью остывания.

Механические испытания на одноосное растяжение стандартных образцов из стали 09Г2С для определения механических свойств проводились на универсальной машине «Инстрон-1195». Испытания на ударный изгиб образцов Шарпи проводились на маятниковом копре «Amsler RKP-450» при температуре 213 К.

Исследование поверхности разрушения образцов Шарпи, испытанных при ударном изгибе при температуре 213 К, проводилось с использованием растрового электронного микроскопа JEOL JSM-7800F в режиме вторичных электронов.

### Результаты исследования и их обсуждение

*Прочность и пластичность стали 09Г2С.* Как видно из табл. 1, всесторонняя ковка в три цикла с нагревом в горне (состояние 2) повысила прочность на ~5–16,5%, при этом пластичность снизилась на 5%. Закалка и РКУП послековки (состояние 3) более значительно (в 3–2,3 раза) повысили прочность стали по сравнению с исходным состоянием при снижении пластичности на 25%. Результаты исследования микроструктуры стали 09Г2С показали, что после обработки заготовок по режимам 2 и 3 формируется мелкозернистая структура со средним размером зерна 3–5 мкм.

Ковка в 3 цикла с охлаждением в масле и с дополнительным упрочнением РКУП в 4 прохода по маршруту  $B_c$  при температуре 673 К (состояние 4) обеспечивает существенное повышение прочностных характеристик стали 09Г2С (в 3 раза по пределу текучести и в 2,4 раза по пределу прочно-

сти по сравнению с состоянием поставки материала), но с существенным падением пластичности (в 2,4 раза). Изменение режима охлаждения как послековки, так и после РКУП влияют на прочность и пластичность стали 09Г2С. Например, при одинаковом режиме РКУП предел прочности в случае охлаждения заготовки в масле послековки на 165 МПа (на 15%) выше, чем в случае выдержки в теплой золе с остыванием на воздухе, а остаточное удлинение на 3,5% (см. состояния 4 и 6). Повышение температуры началаковки на 100 градусов при тех же режимах РКУП снижает прочностные характеристики на 20...70 МПа, что составляет около 2...6% от предела прочности в случае температуры началаковки в 1173 К (см. пп. 4 и 8, 5 и 9). Это связано со снижением плотности дислокаций. В обоих случаях пластичность снижается на 9...17%. Лучшие результаты по характеристикам прочности и пластичности получились по режиму 4 (ковка в 3 цикла, 1173/1023 К, охлаждение в масле + РКУП ( $B_c$ ,  $n = 4$ , 673 К), остывание на воздухе). Как известно, высокую пластичность можно обеспечить последующим отжигом, что было показано нами ранее для ультрамелкозернистых сталей. При этом можно добиться высокой пластичности при сохранении прочности стали, превосходящей её прочность в исходном состоянии.

Как видно из рис. 1, более чем в 30 раз увеличилась область упругих деформаций стали 09Г2С и достигает 15,2 и 13% для кривых 2 и 3, соответственно. Вместе с тем, существенно уменьшилась доля пластической деформации. Упрочнение стали РКУ-прессованием приводит к образованию высокого зуба текучести (кривые 2 и 3 на рис. 1).

*Ударная вязкость КСЧ.* Данные по ударной вязкости КСЧ для 09Г2С в различных состояниях представлены в табл. 2.

Таким образом, послековки и РКУП стали 09Г2С происходит заметное уменьшение размеров зерен, возрастает плотность дислокаций, что влияет на повышение прочностных показателей. Наряду с повышением предела прочности происходит повышение предела текучести, который после комбинированной обработки становится сравнимым с пределом прочности.

Как видно из табл. 2, из рассмотренных случаев наибольшее значение ударной вязкости достигнуто послековки в 3 цикла. Как известно, РКУП с получением мелкозернистой структуры приводит к снижению ударной вязкости. Сочетаниековки и РКУП повышает ударную вязкость и её значение становится больше, чем в состоянии поставки стали 09Г2С.

Таблица 1

Механические характеристики стали 09Г2С в различных состояниях

№ п/п	Состояние материала	$\sigma_r$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %
1	Исходное (состояние поставки)	337	462	24,4
2	Ковка в 3 цикла с нагревом в горне, 1173*/1023** К, охлаждение в масле	393	484	23,2
3	Ковка в 3 цикла с нагревом в горне, 1173–1023 К, охлаждение в масле + закалка в воде от 1203 К + РКУП ( $B_c$ , $n = 4$ , 673 К), остывание на воздухе		1045	7,5
4	Ковка в 3 цикла с нагревом в печи, 1173/1023 К, масло + РКУП ( $B_c$ , $n = 4$ , 673 К), остывание на воздухе		1097	10,22
5	Ковка в 3 цикла с нагревом в печи, 1173/1023 К, масло + РКУП ( $B_c$ , $n = 4$ , 673 К), остывание в воде		1013	9,67
6	Ковка в 3 цикла с нагревом в печи, 1173/1023 К, выдержка в теплой золе, затем остывание на воздухе + РКУП ( $B_c$ , $n = 4$ , 673 К), остывание на воздухе		931	9,89
7	Ковка в 3 цикла с нагревом в печи, 1173/1023 К, выдержка в теплой золе, остывание на воздухе + РКУП ( $B_c$ , $n = 4$ , 673 К), остывание в воде		942	9,34
8	Ковка в 3 цикла с нагревом в печи, 1273/1023 К, масло + РКУП ( $B_c$ , $n = 4$ , 673 К), остывание на воздухе		1030	9,29
9	Ковка в 3 цикла с нагревом в печи, 1273/1023 К, масло + РКУП ( $B_c$ , $n = 4$ , 673 К), остывание в воде		994	7,99

Примечание. Температура: \* – началаковки, \*\* – окончанияковки.

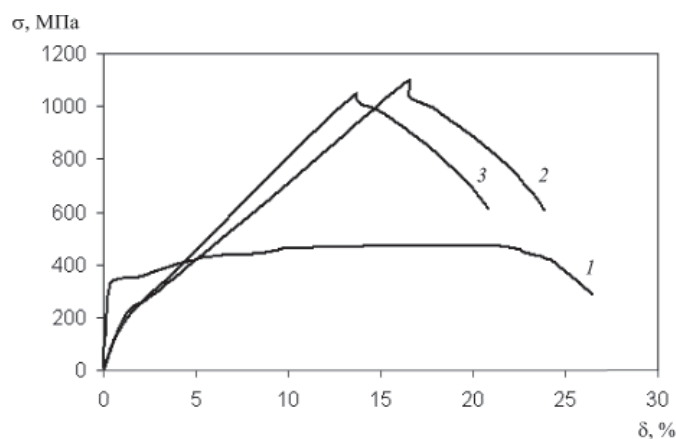


Рис. 1. Диаграммы растяжения стали 09Г2С в различных состояниях:  
 1 – состояние поставки; 2 – ковка в 3 цикла с нагреванием заготовки в печи при 1173/1023 К с охлаждением в масле + РКУП по маршруту  $B_c$  в  $n = 4$  прохода при 673 К с остыванием на воздухе; 3 – ковка (3 цикла, 1273/1023 К), охлаждение в масле + РКУП ( $B_c$ ,  $n = 4$ , 673 К), остывание на воздухе.

Таблица 2

Ударная вязкость стали 09Г2С при температуре 213 К

№ п/п	Режимы обработки	$KCV \cdot 10^4$ , Дж/м <sup>2</sup>
1	Исходное – состояние поставки	26,7
2	Ковка в 3 цикла с нагревом в горне, 1173/1023 К; охлаждение в масле	41,5
3	РКУП, $B_c$ , $n = 2$ , 673 К; остывание на воздухе	15,2
4	Ковка в 3 цикла с нагревом в горне, 1173–1023 К; охлаждение в масле + РКУП ( $B_c$ , $n = 4$ , 673 К), остывание на воздухе	29,3

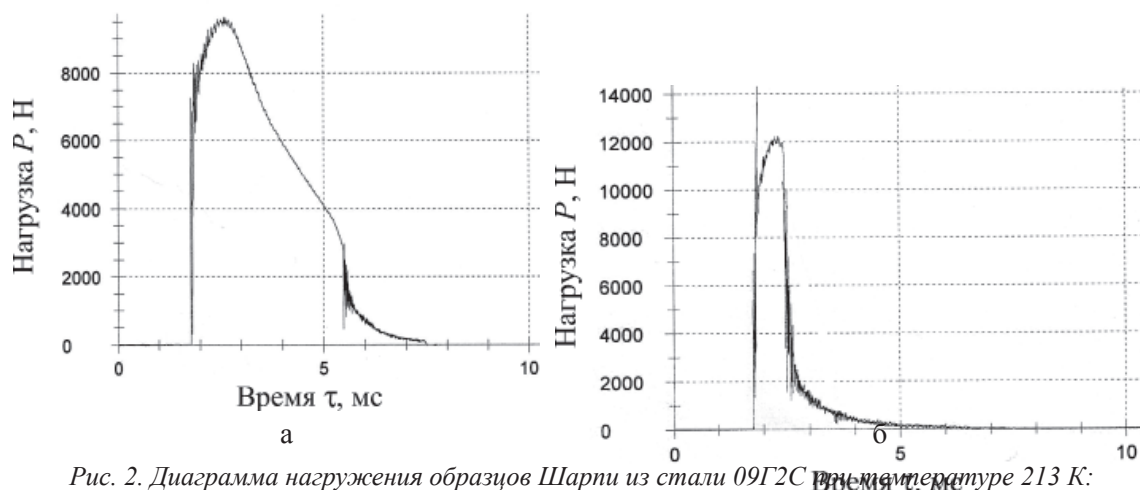


Рис. 2. Диаграмма нагружения образцов Шарпи из стали 09Г2С при температуре 213 К: а – в состоянии поставки; б – после РКУП

Диаграммы нагружения ударного образца в состоянии поставки и образца, подвергнутого РКУП, представлены на рис. 2.

*Механизм разрушения стали 09Г2С в различных состояниях при нагружении ударным изгибом при 213 К.* Представленные в работе фрактограммы получены от участков изломов образцов при увеличении  $\times 1000$ .

Анализ фрактограмм разрушенных при 213 К образцов из стали 09Г2С показал следующее.

**Состояние поставки.** Макрорельеф разрушения при ударном нагружении образцов с V-образным надрезом из стали 09Г2С в состоянии поставки при 213 К ( $KCV = 26,7 \cdot 10^4$  Дж/м<sup>2</sup>) показывает характерные зоны на изломе. Наличие достаточно протяженной матовой зоны в вершине надреза с выраженной рельефностью и значительная утяжка по толщине образца в устье надреза (рис. 3, а) свидетельствует о вязком характере зарождения трещины и высоком значении работы удара, затраченной на зарождение трещины, что подтверждает и диаграмма нагружения ударных образцов (рис. 2, а).

Основную часть поверхности разрушения, более 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. 3, а, б). Средний размер фасеток скола, соответствующий величине ферритных зерен, составляет порядка 15–20 мкм. Однородность поверхности излома свидетельствует о стабильном развитии хрупкой трещины.

**Ковка.** Ковка образца из 09Г2С при указанных параметрах обработки привела

к повышению значения ударной вязкости –  $KCV = 26,7 \cdot 10^4$  Дж/м<sup>2</sup>. Как видно из таблицы 1, послековки при некотором увеличении прочности пластичность практически не снижается.

Излом разрушенного образца, подвергнутого ковке, характеризуется выраженной рельефностью и содержит зоны стабильного роста трещины в устье надреза, зону хрупкого разрушения в центральной части образца, губы среза в периферийных частях и зону долома (рис. 3, в, г). В зоне хрупкого разрушения области межзеренного скола разделены небольшими участками вязкого разрушения сдвигом, наблюдаются продольные и поперечные микротрещины. Губы среза, в которых разрушение происходит по вязкому механизму, занимают значительную часть излома (более 70%), при формировании которых расходуется большая часть работы ударного разрушения.

**РКУП.** РКУ-прессование в  $n = 2$  прохода привело к снижению ударной вязкости до  $KCV = 15,2 \cdot 10^4$  Дж/м<sup>2</sup>. По сравнению с состоянием поставки утяжка в вершине надреза, область зарождения и развития вязкой трещины занимают меньшую площадь. Большая часть разрушенной поверхности соответствует хрупкому разрушению сколом (рис. 3, д). Поверхность разрушения, соответствующая зоне развития хрупкого разрушения, характеризуется более выраженной рельефностью по сравнению с состоянием поставки, что обусловлено измельчением и разориентировкой структурных составляющих (рис. 3, е). Средний размер фасеток скола составляет порядка 5–10 мкм. Как видно из диаграммы на рис. 2, б, материал образца характеризуется низким сопротивлением к зарождению и распространению хрупкой трещины.

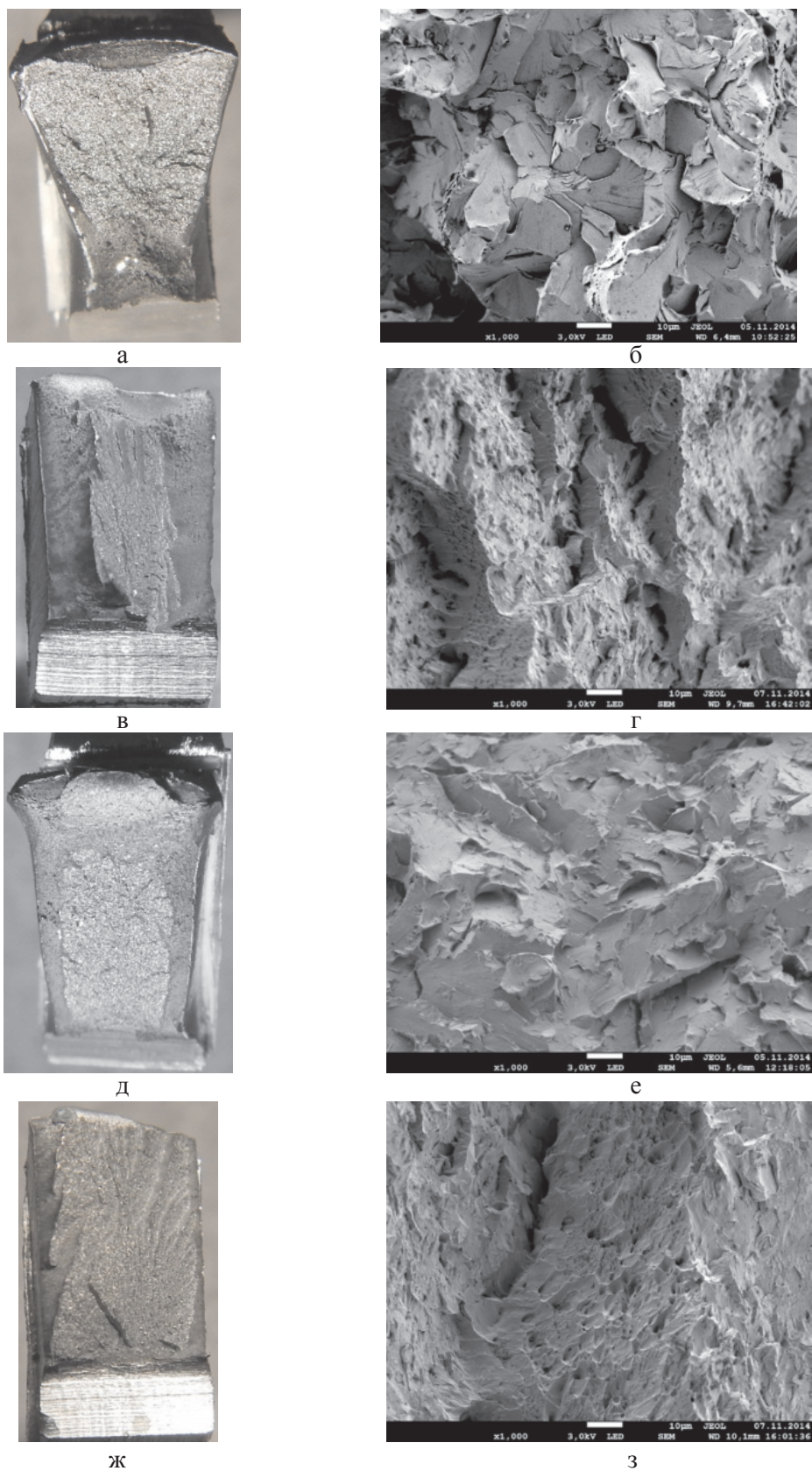


Рис. 3. Макро- и микрорельеф изломов образцов из стали 09Г2С, подвергнутых:  
 а и б – в состоянии поставки; в и г – ковке в 3 цикла с нагревом в горне, началом/окончанием процесса  
 ковки при температуре 1173/1023 К и охлаждением в масле; д и е – РКУП в  $n = 2$  прохода по  
 маршруту  $V_c$  при температуре 673 К; ж и з – ковке (3 цикла, 1173/1023 К) и РКУП ( $n = 4$ ,  $V_c$ , 673 К).

**Комбинирование ковки и РКУП.** Результатом комбинированной обработки 09Г2С ковкой и РКУП стало увеличение ударной вязкости до значений  $KCV = 29,3 \cdot 10^4$  Дж/м<sup>2</sup>, что превышает  $KCV$  в случае РКУП и состояния излома (более 80%) является зоной хрупкого разрушения и характеризуется смешанным рельефом, включающим в себя сочетание внутризеренного скола и вязкого ямочного разрушения (рис. 2, 3, ж), что свидетельствует о том, что основная работа ударного разрушения в материале расходуется на стадии распространения трещины. Как известно, обработка РКУ-прессованием, а также комбинированием ковки и РКУП приводит к измельчению зерен и значительному повышению прочностных характеристик. При этом, с одной стороны, повышение предела текучести при ТМО вызывает снижение параметра энергоемкости  $K_y$  (энергоемкость на стадии докритического роста трещины), а уменьшение размера зерна, наоборот, повышению  $K_y$  [2] и, как показал анализ механизма разрушения таких материалов, – к возрастанию сопротивления разрушению на стадии распространения трещины.

#### Заключение

Таким образом, на основе проведенных исследований показано, что термомеханическая обработка стали 09Г2С различными видами механической обработки и в сочетании друг с другом, включая интенсивную пластическую деформацию по схеме равноканального углового прессования, обеспечивает различный уровень прочности, пластичности и ударной вязкости.

#### Выводы

1. Варьированием режимов предварительной термомеханической обработки (ковки) и РКУП можно регулировать состояние и механические свойства низколегированной стали 09Г2С, обеспечивая необходимый уровень этих характеристик.

2. При рассмотренных случаях обработки наилучшие показатели по прочности и пластичности достигнуты при следующем режиме:

1) ковка в 3 цикла с началом циклаковки при 1173 К и его завершением при 1023 К, и с последующим охлаждением в масле;

2) РКУП в  $n = 4$  прохода по маршруту  $B_c$  при температуре 673 К с последующим остыванием заготовки на воздухе.

3. Установлено, что комбинированиековки и РКУП при значительном повышении прочности обеспечивает и увеличение параметров сопротивления разрушению. Если в случае обработки ковкой высокие значения ударной вязкости, энергоемкости разрушения можно объяснить обеспечением высокой пластичности материала, то комбинацияковки и РКУП приводит к возрастанию сопротивления материала хрупкому разрушению.

Результаты исследования могут быть использованы при разработке технологий упрочнения и повышения хладостойкости конструкционных сталей.

*Работа выполнена в рамках научного проекта № 25.7 по Программе Президиума Российской Академии наук № 25.*

#### Список литературы

1. Ботвина Л.Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. – М.: Наука, 2008. – 334 с.
2. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. – М.: Логос. 2000. – 272 с.
3. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов: учебник для вузов. – 2-е изд. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
4. Иванов А.М. Эффективность комбинирования термомеханических методов обработки сталей // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – № 2–4 (292). – С. 25–33.
5. Иванов А.М. Комбинирование методов механической обработки сталей // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. – № 1 (2). – С. 375–377.
6. Иванов А.М., Лукин Е.С. Комбинирование методов обработки – эффективный способ управления ударной вязкостью сталей // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. – № 4(5). – С. 1239–1242.
7. Процессы пластического структурообразования металлов / Сегал В.М., Резников В.И., Копылов В.И., Павлик Д.А., Малышев В.Ф. – Минск: Наука и техника. 1994. – 231 с.

#### References

1. Botvina L.R. Razrusheniye: kinetika, mekhanizmy, obshchiye zakonomernosti [Destruction: kinetics, mechanisms, general regularities]. Moscow, Nauka, 2008. 334 p.
2. Valiev R.Z., Alexandrov I.V. Nanostrukturnyye materialy, poluchennyye intensivnoy plasticheskoy deformatsiyey [Nanostructured materials obtained by severe plastic deformation]. Moscow, Logos, 2000. 272 p.
3. Zolotarevskiy V.S. Mekhanicheskiye svoystva metallov: Uchebnik dlya vuzov. 2-e izd. [Mechanical properties of metals: Textbook for high schools]. Moscow, Metallurgiya, 1983. 352 p.
4. Ivanov A.M. Effektivnost' kombinirovaniya termoplasticheskikh metodov obrabotki staley [The effectiveness of the combination of thermoplastic processing methods steels] // Fundamental and applied problems of engineering and technology (Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii). 2012, no. 2–4 (292), pp. 25–33.
5. Ivanov A.M. Kombinirovaniye metodov mekhanicheskoy obrabotki staley [Combining methods machining of steels] // Definitions of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk). 2012, v. 14, no. 1 (2), pp. 375–377.
6. Ivanov A.M., Lukin E.S. Kombinirovaniye metodov obrabotki effektivnyy sposob upravleniya udarnoy vyazkost'yu staley [Combination processing methods an effective method for controlling toughness steels] // Definitions of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk). 2012, v. 14, no. 4(5), pp. 1239–1242.
7. Protsessy plasticheskogo strukturoobrazovaniya metall-ov [Plastic structure formation processes of metals] / Segal V.M., Reznikov V.I., Kopylov V.I., Pavlik D.F.A., Malyshev V.F. Minsk, Nauka i tekhnika, 1994. 231 p.

#### Рецензенты:

Лепов В.В., д.т.н., зам. директора по науке, ФГБУН «Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН», г. Якутск;

Левин А.И., д.т.н., зав. сектором ритмологии северной техники, ФГБУН «Якутский научный центр СО РАН», г. Якутск.

Работа поступила в редакцию 28.01.2015