

## МЕХАНО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА КОНСТРУКЦИОННОЙ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ 09Г2С

Перцев А.С.<sup>1</sup>, Панов Д.О.<sup>1</sup>, Смирнов А.И.<sup>2</sup>, Симонов Ю.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия (614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29), e-mail: [mto@pstu.ru](mailto:mto@pstu.ru).

<sup>2</sup> ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет», Новосибирск, Россия (630073, г. Новосибирск, проспект Карла Маркса, 20), e-mail: [micros20t@mail.ru](mailto:micros20t@mail.ru).

В статье исследовали закономерности формирования структуры и свойств конструкционной стали 09Г2С на разных этапах механо-термической обработки. Перед холодной радиальной ковкой трубные заготовки из стали 09Г2С подвергали предварительной обработке – термическому улучшению. В работе использовали методы металлографического анализа, просвечивающей электронной микроскопии, проводили испытания на одноосное растяжение и ударную вязкость КСУ и КСТ. Результаты исследований показали, что при холодной радиальной ковке трубных заготовок происходит диспергирование элементов структуры и субструктуры исследуемой стали в результате процессов фрагментации структуры. В микроструктуре стали 09Г2С после холодной РК участки структурно свободного феррита менее явно выражены за счет образования в них большого числа границ зерен/субзерен, по сравнению с исходным термоулучшенным состоянием. Последеформационный нагрев стали 09Г2С на 500°С и 600°С вызывает протекание процессов рекристаллизации, микроструктура при этом становится практически однородной по сечению стенки трубной заготовки. Средний размер субзерна  $\alpha$ -фазы после холодной пластической деформации со степенью 55% и отжига при 500 °С в течение 1 часа составляет 555 нм. Холодная пластическая деформация методом радиальнойковки с увеличением степени деформации вызывает рост характеристик прочности  $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_B$  исходно термоулучшенной конструкционной стали 09Г2С на 50% и 30% соответственно. Относительное удлинение снижается практически в 2 раза, характеристики ударной вязкости остаются на достаточно высоком уровне. Последеформационный отжиг конструкционной стали 09Г2С на 600°С приводит к получению характеристик механических свойств  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$ , КСУ и КСТ на уровне исходно термоулучшенного состояния, а характеристики пластичности значительно снижаются –  $\delta$  на 42%, а  $\psi$  на 10%.

Ключевые слова: радиальная ковка, холодная пластическая деформация, субструктура, предел прочности, предел текучести, ударная вязкость.

## MECHANICAL AND HEAT TREATMENT OF THE STRUCTURAL LOW-CARBON STEEL 09G2S

Pertsev A.S.<sup>1</sup>, Panov D.O.<sup>1</sup>, Smirnov A.I.<sup>2</sup>, Simonov Y.N.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia (614990, Perm, Komsomol avenue, 29), e-mail: [mto@pstu.ru](mailto:mto@pstu.ru)

<sup>2</sup> Novosibirsk State Technical University Novosibirsk, Russia (630073, Novosibirsk, Karl Marx avenue, 20), e-mail: [micros20t@mail.ru](mailto:micros20t@mail.ru)

We investigated the laws of formation of the structure and properties of structural steel 09G2S at different stages of mechanical and heat treatment. Round billets of steel 09G2S were subjected to pretreatment - toughening before cold radial forging. We used methods of metallographic analysis, transmission electron microscopy, carried out tests on the uniaxial tension and impact toughness KCU and the KCT. The results showed that the cold forging of round billets causes dispersion the elements of the structure and subgrain structure of the investigated steel as a result of the fragmentation structure by cold plastic deformation. The structurally free ferrite, which was observed in the structure of the investigated steel after toughening, is practically absent in the structure of steel 09G2S. Heating the steel 09G2S after deformation to 500 °C and 600 °C causes a behavior of recrystallization processes, and microstructure becomes homogeneous in the wall section of round billets and there are no areas of excessive ferrite. The average size of subgrains of  $\alpha$ - phase is 555 nm after cold plastic deformation with a deformation ratio of 55% and annealing at 500 °C. With increasing deformation ratio the cold plastic deformation by radial forging causes an increase in the strength characteristics  $\sigma_{0,2}$  and  $\sigma_B$  of structural steel 09G2S after toughening by 50 % and 30 %, respectively. The elongation is reduced by almost 2 times, impact toughness remains at a high level. After annealing of deformed structural steel 09G2S at 600 °C the characteristics of the mechanical properties  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$ , KCU and the KCT are equal the characteristics of the mechanical properties of structural steel 09G2S after toughening, and the ductility significantly reduces -  $\delta$  by 42%, and  $\psi$  by 10%.

Keywords: radial forging, cold plastic deformation, subgrain structure, tensile strength, yield strength, impact toughness.

## **Введение**

Получение ультрамелкозернистого (УМЗ) и нанокристаллического (НК) состояния с высоким комплексом механических свойств в промышленных масштабах является актуальной задачей современного металловедения. В связи с этим в последнее время активно развиваются подходы к получению таких материалов [1].

Одним из методов диспергирования структуры материалов является механо-термическая обработка, которая включает холодную радиальную ковку и последующий отжиг. Радиальная ковка обеспечивает высокие степени деформации в промышленных условиях для высокоточных длинномерных поковок, при этом достигается высокая дробность деформации благодаря использованию вырезных фасонных бойков [2]. Во время ковки происходит многократное перекрытие очагов деформации с накоплением высоких степеней деформации. Последующий отжиг вызывает развитие рекристаллизационных процессов с формированием дисперсной структуры [3, 4].

Таким образом, целью данной статьи является исследование закономерностей формирования структуры и свойств конструкционной стали на разных этапах механо-термической обработки.

## **Материалы и методики эксперимента**

В качестве материала исследования выбрана конструкционная низкоуглеродистая сталь 09Г2С следующего химического состава, % (масс.): 0,11 С; 0,50 Si; 1,26 Mn; 0,22 Cr; 0,14Ni; 0,14 Mo; 0,005S; 0,017P.

Предварительная термическая обработка трубных заготовок из исследуемой стали заключалась в термическом улучшении: закалка в воде от температуры 920°C, время выдержки 30 минут с последующим отпуском при температуре 570°C в течение 1 часа с охлаждением в воде.

Холодную пластическую деформацию трубных заготовок проводили в три прохода на радиально-ковочной машине SXP-16 с частотой 1000 ударов в минуту, заготовку при этом вращали вокруг своей оси со скоростью 25 оборотов в минуту с суммарной степенью деформации 55%.

Микроструктуру исследуемых сталей исследовали на микрошлифах с использованием светового микроскопа Olympus GX51. Для выявления микроструктуры поверхность микрошлифов подвергали травлению в 4%-ном спиртовом растворе азотной кислоты. Тонкую структуру сталей изучали на просвечивающем электронном микроскопе FEI Tecnai 20 G2 TWIN при ускоряющем напряжении 200 кВ.

Характеристики прочности и пластичности определяли на цилиндрических образцах с начальным диаметром 5 мм, в соответствии с требованиями ГОСТ 1497-73, на

универсальной гидравлической системе для статических испытаний «INSTRON-SATEC 300 LX».

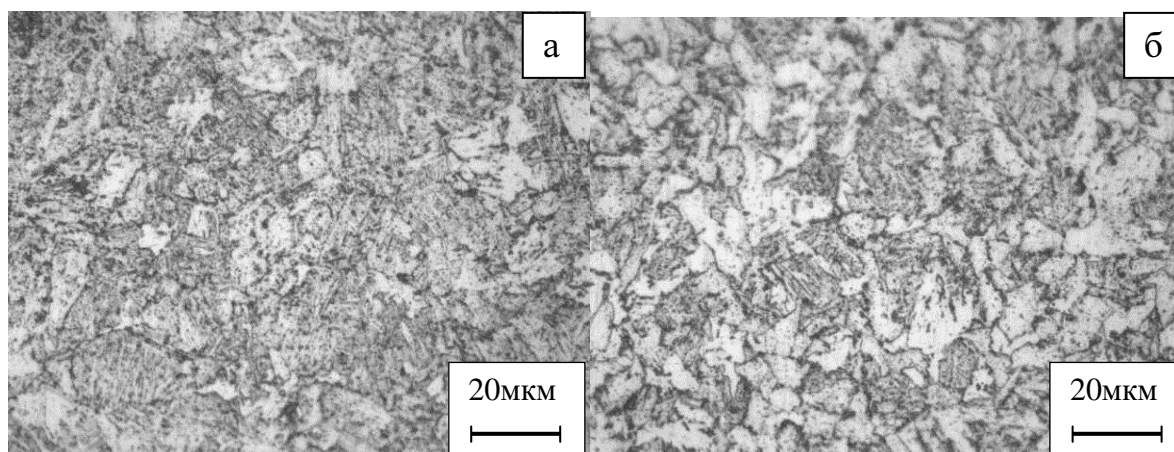
Испытания на ударную вязкость проводили на образцах типа 3 и типа 17 по ГОСТ 9454-78 на маятниковом копре КМ-30 при комнатной температуре. Трещину наносили на вибраторе Дроздовского.

### Результаты и их обсуждение

Для исследования формирования структуры и свойств при механо-термической обработке выбрана низколегированная конструкционная низкоуглеродистая сталь 09Г2С в исходно термоулучшенном состоянии. Структура трубной заготовки исследуемой стали на наружной и внутренней поверхности после термического улучшения и холодной пластической деформации методом радиальнойковки со степенью 55% представлена на рисунке 1, а и б.

После термического улучшения в стали 09Г2С реализуется структура сорбита отпуска с избыточной ферритной фазой. Причем вблизи наружной и внутренней поверхностей трубы структура отличается количеством избыточной ферритной фазы, что можно объяснить низкой прокаливаемостью исследуемой стали. Количество структурно свободной ферритной фазы на внешней поверхности составляет порядка 20% (рис. 1, а), а на внутренней – порядка 50% (рис. 1, б).

Холодная пластическая деформация методом радиальнойковки со степенью 55% нивелирует структурные отличия в строении внешней и внутренней поверхности исходно термоулучшенной трубной заготовки (рис. 1, в и г) за счет образования большого количества границ зерен/субзерен в структурно свободном феррите стали 09Г2С. Другими словами, холодная РК позволяет исправлять дефекты термического улучшения низколегированных сталей (таких как структурно свободный феррит) за счет их диспергирования. Такой эффект вызван измельчением элементов структуры и субструктуры исследуемой стали в результате развития процессов фрагментации структуры при холодной пластической деформации [5].



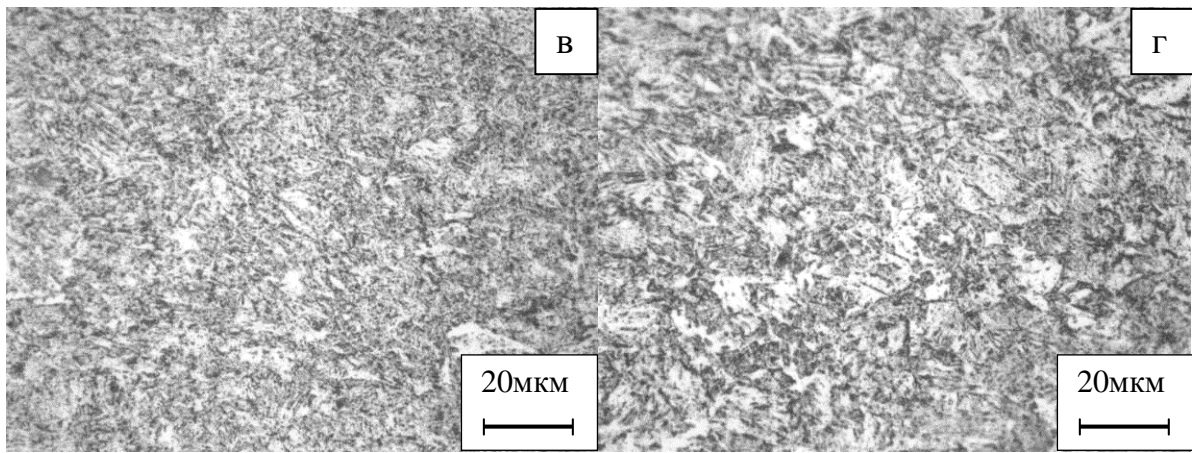


Рисунок 1. Микроструктура конструкционной низкоуглеродистой стали 09Г2С в термоулучшенном состоянии (а, б) и после радиальнойковки со степенью  $\varepsilon = 55\%$  (в, г) вблизи наружной (а, в) и внутренней (б, г) поверхности.

Микроструктура стали 09Г2С, подвергнутой последеформационному нагреву до температур 500 и 600°C, приведена на рисунке 2. При рекристаллизационном отжиге в интервале температур 500...600°C холоднодеформированной стали получают развитие процессы рекристаллизации, и структура становится однородной по всему сечению стенки трубной заготовки, при этом участки структурно свободного феррита методом световой микроскопии практически не выявляются.

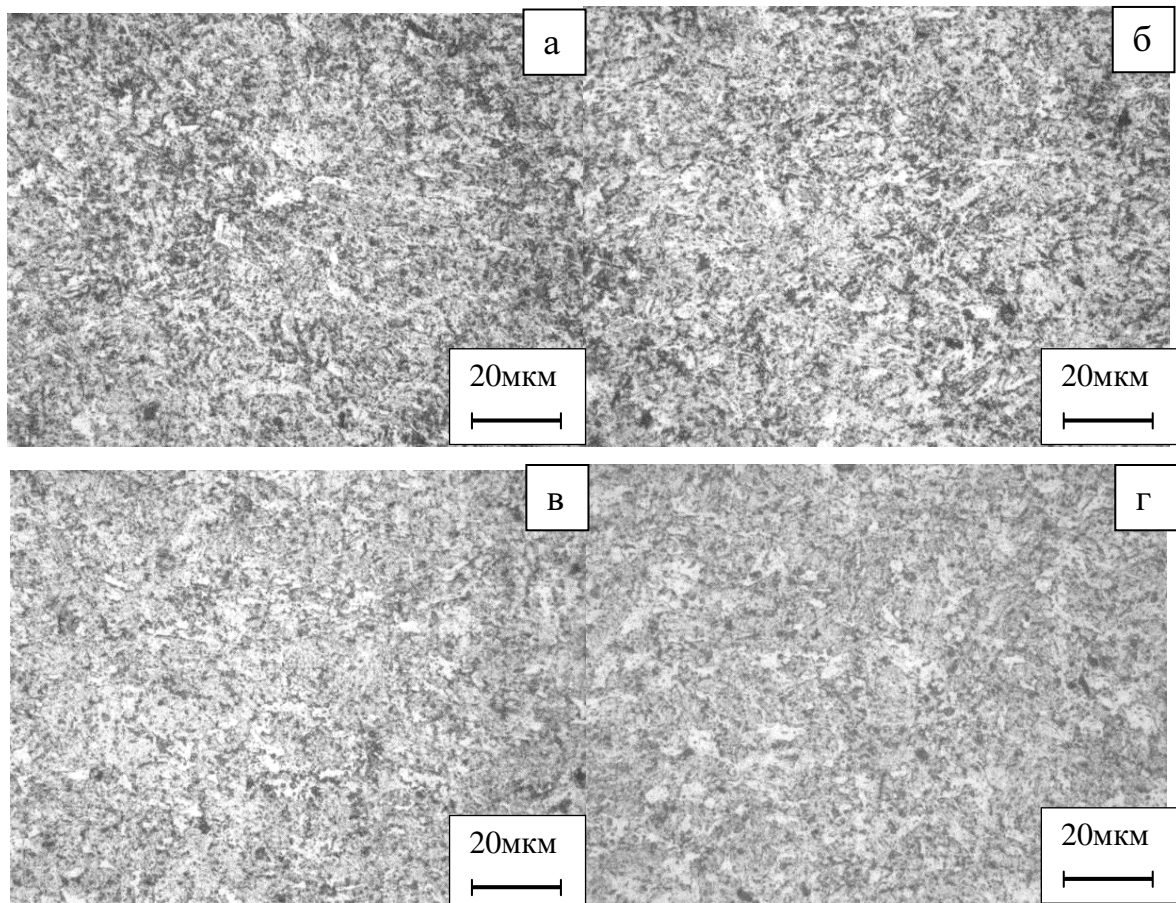


Рисунок 2. Микроструктура конструкционной низкоуглеродистой стали 09Г2С вблизи наружной (а, в) и внутренней (б, г) поверхностей трубной заготовки, подвергнутой последеформационному отжигу: а, б – при 500°С; в, г – при 600°С.

Для изучения тонкой структуры стали 09Г2С после холодной пластической деформации методом радиальнойковки со степенью 55% и последующего отжига при температуре 500°С была использована просвечивающая электронная микроскопия (рис. 3, а). В структуре исследуемой стали после такого режима обработки сохраняются объемы деформированного металла, в которых процессы рекристаллизации сдерживаются мелкодисперсными карбидами. Характер распределения зерен и субзерен по размерам для исследуемых сталей также имеет левую асимметрию и носит логнормальный характер (рис. 3, б). Средний размер субзерна  $\alpha$ -фазы после отжига при 500 °С составляет 555 нм, т.е. в данных условиях в стали 09Г2С формируется ультрамелкозернистая структура.

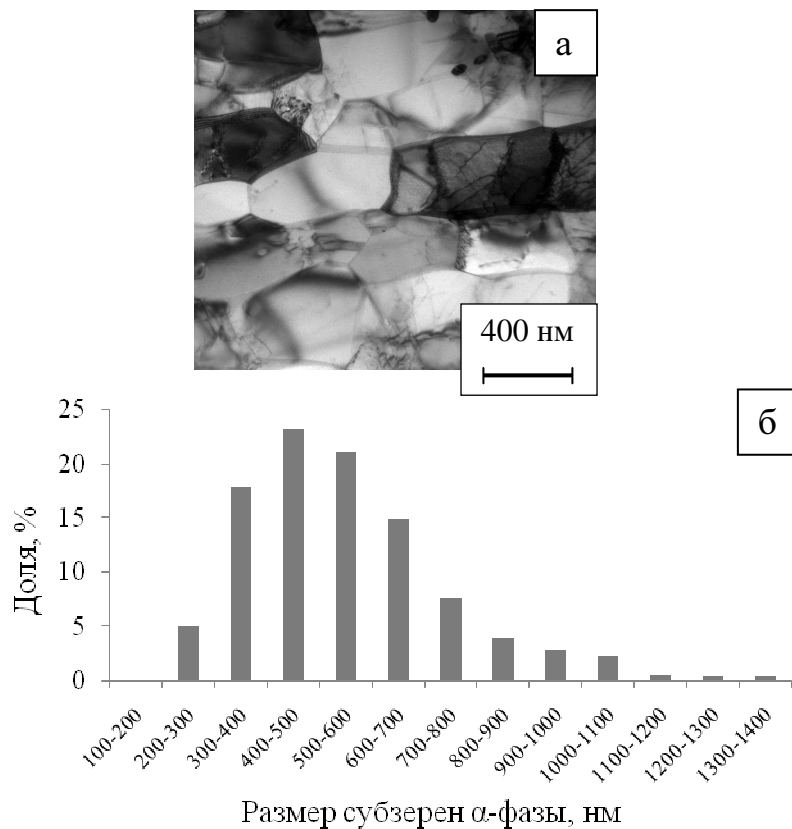


Рисунок 3. Тонкая структура (а) и гистограмма распределения субзерен  $\alpha$ -фазы по размерам (б) стали 09Г2С после холодной пластической деформации методом радиальнойковки со степенью 55% и последеформационного отжига при температуре 500 °С.

Результаты испытания характеристик механических свойств конструкционной низкоуглеродистой стали 09Г2С на разных этапах механо-термической обработки приведены

в таблице 1.

При холодной радиальной ковке стали 09Г2С происходит упрочнение: после деформации со степенью 55% наблюдается рост предела текучести на 50%, а предел прочности повышается практически на 30%. Характеристики пластичности после холодной пластической деформации существенно снижаются: относительное удлинение уменьшается практически в 2 раза по сравнению с исходным термоулучшенным состоянием.

Характеристики ударной вязкости образцов исследуемой стали в результате холодной пластической деформации снижаются в среднем на 15%, но по-прежнему остаются на достаточно высоком уровне (таблица 1).

Последеформационный нагрев на 300°С стали 09Г2С не приводит к существенному изменению характеристик механических свойств, однако при этом снижается уровень относительного удлинения на 25%. Изменение относительного сужения и ударной вязкости образцов с U-образным концентратором и с трещиной не превышает 10% по сравнению с исходным термоулучшенным состоянием.

Таблица 1. Значения механических свойств стали 09Г2С после различных режимов обработки.

Режим обработки	$\sigma_{0,2}$ ( $\sigma_{ТВ}/\sigma_{Т}$ )	$\sigma_{В}$	$\delta$	$\psi$	$KCU$	$KCT$
	МПа		%		МДж/м <sup>2</sup>	
Улучшение	520	650	33	79	2,50	2,10
Один проход РК ( $\epsilon \approx 20\%$ )	640	690	22	75,5	2,25	1,80
Два прохода РК ( $\epsilon \approx 40\%$ )	705	755	22	74	2,15	1,75
Три прохода РК ( $\epsilon \approx 55\%$ )	770	825	17,5	69,5	2,3	1,75
Три прохода РК ( $\epsilon \approx 55\%$ ) + нагрев 300°С (1 час)	815/810	815	13	70,5	2,0	1,65
Три прохода РК ( $\epsilon \approx 55\%$ ) + нагрев 500°С (1 час)	665/660	675	19	71	2,1	1,60
Три прохода РК ( $\epsilon \approx 55\%$ ) + нагрев 600°С (1 час)	565/560	595	23	74	2,5	2,2

Примечание: В столбце предела текучести через дробь приведены верхний (числитель) и нижний (знаменатель) пределы текучести.

Отжиг при температуре 500°С вызывает разупрочнение исследуемой стали: прочностные характеристики снижаются на 15% по сравнению с холоднодеформированным состоянием, при этом предел прочности практически равен значению, полученному после термического улучшения. Предел текучести стали 09Г2С после отжига на 500°С на 25% выше, чем в исходном термоулучшенном состоянии. Относительное удлинение в этом случае несколько увеличивается по сравнению с деформированным состоянием, но его уровень практически в два раза ниже по сравнению с термоулучшенным состоянием. Относительное удлинение и ударная вязкость остаются на уровне холоднодеформированного состояния (таблица 1).

Увеличение температуры отжига стали 09Г2С до 600°С приводит к получению характеристик механических свойств  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$ , КСЧ и КСЧ на уровне исходно термоулучшенного состояния, а характеристики пластичности значительно снижаются –  $\delta$  на 42%, а  $\psi$  на 10%.

### **Заключение**

Таким образом, холодная пластическая деформация методом радиальнойковки вызывает уменьшение структурных отличий в строении внешней и внутренней поверхности исходно термоулучшенной трубной заготовки, что связано с диспергированием элементов структуры и субструктуры исследуемой стали в результате развития процессов ее фрагментации. Последеформационный нагрев на температуру 500 или 600°С вызывает развитие процессов рекристаллизации, при этом в микроструктуре, исследуемой с помощью светового микроскопа, практически не выявляются участки структурно свободного феррита. Таким образом, холодная РК и последеформационный нагрев позволяют исправлять дефекты микроструктуры, полученные при закалке и высоком отпуске (такие как структурно свободный феррит) за счет их диспергирования. После отжига при температуре 500°С формируется ультрамелкозернистая структура со средним размером субзерна  $\alpha$ -фазы 555 нм.

Увеличение степени холодной пластической деформации вызывает рост характеристик прочности ( $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_B$ ) исходно термоулучшенной конструкционной стали 09Г2С, а характеристики пластичности ( $\psi$  и  $\delta$ ) и ударной вязкости (КСЧ и КСЧ) при холодной пластической деформации несколько снижаются, но остаются на достаточно высоком уровне.

Последеформационный нагрев на 300°С практически не изменяет характеристики прочности, которые сохраняются на уровне холоднодеформированного состояния, а характеристики надежности несколько снижаются. За счет низкой отпускостойчивости

конструкционной стали 09Г2С последеформационный нагрев на 500...600°С вызывает снижение характеристик прочности, относительного сужения и ударной вязкости КСУ и КСТ, по сравнению с деформированным состоянием. Нагрев в данном интервале температур формирует комплекс механических свойств:  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$ ,  $\psi$ , КСУ и КСТ на уровне исходного термоулучшенного состояния, а относительное удлинение уменьшается на 30%.

Данная комплексная механо-термическая обработка, включающая как холодную радиальную ковку, так и последеформационный нагрев стали 09Г2С, позволяет исправлять дефекты микроструктуры, полученные при исходном термическом улучшении, и значительно повышает сопротивление хрупкому разрушению за счет общей фрагментации структуры.

***Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0068 от 23.05.2013 г. в составе мероприятия по реализации постановления Правительства РФ № 218).***

#### Список литературы

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. – М.: Логос, 2000. – 272 с.
2. Тюрин В.А., Лазоркин В.А., Поспелов И.А. Ковка на радиально-обжимных машинах. – М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.
3. Кайбышев О. А. Сверхпластичность промышленных сплавов. – М.: Металлургия, 1984.
4. Балахнин А.Н., Панов Д.О., Титова М.Г., Перцев А.С., Смирнов А.И., Симонов Ю.Н. // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2012. - № 11 . – С. 22-27.
5. Глезер А.М., Метлов Л.С. Физика мегапластической (интенсивной) деформации твердых тел // Физика твердого тела. – 2010. – Т. 52. - № 6. – С. 1090-1097.

#### Рецензенты:

Ханов А.М., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой КМиТОМ Механико-технологического факультета ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.

Беленький В.Я., д.т.н., профессор, декан Механико-технологического факультета ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.