

Engineering Materials. – 2007. – Vol. 345–346. – P. 809–812.

8. Lepov V.V., Loginov A.B. Non-Markovian evolution approach to structural modeling of material fracture // World Journal of Engineering. – 2012. – Vol. 9(3). – P. 207–212.

9. Лепов В.В., Ларионов В.П., Алымов В.Т. Новые подходы к оценке предельного состояния конструкций // Наука и образование. – 2001. – №3. – С. 36–42.

10. Лепов В.В., Иванова А.А., Ачикасова В.С., Лепова К.Я. Структурно-статистический подход к иерархическому моделированию эволюции поврежденности // Международная конференция «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании»: тезисы докладов. – Павлодар, Казахстан, 20–22 сентября 2006 г. Электронный ресурс http://www.sbras.ru/ws/show_abstract.dhtml?ru+148+10056.

11. Ачикасова В.С., Лепов В.В. Низкотемпературный вязкохрупкий переход и внутреннее трение // Наука и образование. – 2015. – № 1. – С. 75–77.

12. Григорьев А.В., Лепов В.В., Тагров В.Н. Оценка ресурса элементов железнодорожной техники, эксплуатирующейся в условиях низких климатических температур // Наука и образование. – 2014. – № 1. – С. 35–39.

13. Архангельская Е.А., Лепов В.В., Ларионов В.П. Связная модель замедленного разрушения повреждаемой среды // Физическая мезомеханика. – 2001. – Т. 4, № 4. – С. 81–87.

14. Лепов В.В. Искусство принятия решений: краткая история и современное состояние // Наука и образование. – 1996. – № 2. – С. 93–97.

Поступила в редакцию 01.10.2015

УДК 620.172.224.2

Влияние экструзии и винтового прессования на структуру и механические свойства низколегированной стали

А.М. Иванов, Н.Д. Петрова, В.В. Лепов

Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск

Представлен комбинированный метод интенсивной пластической деформации, сочетающий экструзию и винтовое прессование. Метод реализован в разработанном устройстве и позволяет получить металлический винтовой профиль из упрочненного ультрамелкозернистого материала. Описываются технологическая оснастка и параметры испытаний, приведены данные о структуре материала, механических свойствах низколегированной стали, подвергнутой комбинированному воздействию экструзией и винтовым прессованием. Измельчение структуры позволило повысить прочность стали в 1,4 раза со снижением пластичности на 38 %. Анализ структуры позволил предположить, что упрочнение материала произошло за счет дисперсионного упрочнения и повышения плотности дислокаций, в отличие от дробления и размытия зерен феррита в случае сильных степеней деформации, а также фрагментации субзернистых блоков при реализации схемы прессования с гидростатическим давлением.

Ключевые слова: экструзия, винтовое прессование, сталь, структура, механические свойства.

Influence of Extrusion and Helical Pressing on Structure and Mechanical Properties of Low-Alloy Steel

A.M. Ivanov, N.D. Petrova, V.V. Lepov

Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk

A combined method of intensive plastic deformation combining extrusion and screw pressing is presented. The method has been realized in the developed device and allows to produce a metal screw profile from a

ИВАНОВ Афанасий Михайлович – к.т.н., в.н.с., a.m.ivanov@iptpn.ysn.ru; ПЕТРОВА Нюргуяна Дмитриевна – м.н.с., nakalykay@mail.ru; ЛЕПОВ Валерий Валерьевич – д.т.н., проф., зам. директора, lepov@iptpn.ysn.ru.

strengthened ultrafine-grained material. The technological tooling and test parameters are described. The data about obtained ultrafine grain structure, mechanical properties of the low-alloyed steel subjected to the combined influence by extrusion and screw pressing are provided. After crushing of structure with grain refinement the steel durability increased by 1.4 times and its plasticity decreased by 38%. The analysis of the structure let us to assume that the material strengthening is caused by dispersive strengthening and increase of closeness of dislocations, unlike crushing and degradation of ferrite grains in case of strong extents of deformation, and also fragmentation the subgrain blocks at implementation of the scheme of pressing with hydrostatic pressure.

Key words: extrusion, screw pressing, steel, structure, mechanical properties.

Введение

Повышение физико-механических характеристик материалов методом изменения их структуры требует разработки новых методов и технологий обработки материалов и изучения механизмов их деформирования и разрушения. К одной из важнейших технических и технологических задач современного материаловедения относится получение заготовок сложной формы из объемных ультрамелкозернистых или наноструктурированных материалов. Известно, что методами интенсивной пластической деформации (ИПД) из заготовки определенной формы возможно получение изделия той же формы из упрочненного металлического материала [1,2]. Следующий этап – изготовление изделий нужной формы. Поэтому отдельный интерес представляет получение заготовок сложной формы, в частности, максимально приближенной к будущему изделию, непосредственно в процессе интенсивной пластической деформации. Решение такой задачи сократило бы число этапов обработки и продолжительность изготовления изделий.

Одним из перспективных методов ИПД является винтовая экструзия (ВЭ) [3]. В работе, посвященной экспериментальному исследованию этого метода [4], показано, что ИПД со сдвигом при винтовом прессовании без нагрева предварительно отожженной стали Ст3 приводит к значительному измельчению структуры зерен преимущественно с малоугловыми границами ($\approx 75\%$). В результате такого прессования со степенью деформации $\epsilon=4$ достигнуто значительное повышение прочности и снижение пластичности. Теплая винтовая экструзия низкоуглеродистой стали 20Г2С с накопленной деформацией $\epsilon=6$ приводит к измельчению структуры с сохранением значительной доли высокоугловых границ, размытию текстуры, однородному распределению зерен, а также к развитию динамической рекристаллизации [5]. Для этой же стали в [6] при тепловой ВЭ наблюдается неоднородность структуры: в продольном сечении преобладают вытянутые зерна (с фактором формы, равным 2), в поперечном – равноосные. Для управления процессом структурообразования в материале определен-

ные перспективы имеют комбинированные методы интенсивной пластической деформации со сдвигом, в которых реализуются различные схемы деформации.

Цель работы – изучить изменение структуры и механические свойства низколегированной конструкционной стали 09Г2С после комбинированного воздействия экструзией и винтовым прессованием.

Материалы и методы исследования

Объект исследования – конструкционная низколегированная сталь 09Г2С в состоянии поставки и после комбинированной обработки по схеме «экструзия + винтовое 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)».

Нами предложен и реализован комбинированный метод, объединяющий две схемы – экструзию и винтовое прессование (ЭВП) с их реализацией в одном технологическом процессе и устройстве. В основу метода положен запатентованный способ комбинированной интенсивной пластической деформации заготовок [7]. Данный комбинированный метод заключается в том, что объемная заготовка экструдировается, а затем продавливается через винтовой канал в одном устройстве. Комбинированная обработка заготовок $\varnothing 11,8 \times 60$ мм из стали 09Г2С выполнялась в разработанном устройстве (рис. 1). Продавливание заготовки (рис. 2,а) в $n=1$ проход осуществлялось с помощью технологического оборудования на базе гидравлического пресса «ПСУ 125» типа ЗИМ усилием 1250 кН. При этом до обработки заготовка предварительно нагревалась и выдерживалась в муфельной печи до температуры 773 К, а затем помещалась в нагретую с помощью накидной печи до 773 К технологическую оснастку. Для уменьшения трения поверхности заготовки об стенки канала матрицы использовалась технологическая смазка «РО-СОЙЛ-АНГЕЛИНА» с добавками чешуйчатого графита. Усилие прессования не превысило 67 кН.

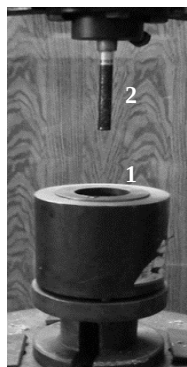


Рис. 1. Устройство для экструзии и винтового прессования: 1 – пуансон; 2 – оснастка (матрица с каналами)

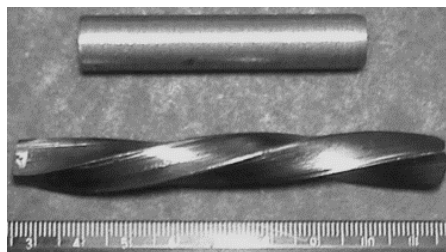


Рис. 2. Заготовки из стали 09Г2С до (а) и после (б) комбинированной обработки

Механические испытания на одноосное растяжение цилиндрических образцов из стали 09Г2С с рабочим размером $\varnothing 3 \times 15$ мм для определения механических свойств проводились на испытательной машине Инстрон-1195 при скорости нагружения $3,33 \cdot 10^{-5}$ м·с⁻¹. Структуру стали 09Г2С анализировали с помощью оптической микроскопии «Neophot-32». Средний размер зерна рассчитывали методом секущих усреднением результатов для более чем 20 зерен.

Результаты и обсуждение

В результате комбинированной обработки получили винтовой профиль из 09Г2С (рис. 2, б). Получение такого профиля объясняется тем, что длина калибрующего участка меньше диаметра окружности, описанной вокруг поперечного сечения канала.

При исследовании микроструктуры образцов ферритно-перлитной стали 09Г2С было выявлено, что средний размер зерна в исходном состоянии равен 11,97 мкм. В результате ЭВП формируется фрагментированная структура со средним размером зерна $\approx 7,8$ мкм, а также наблюдается вытянутость ферритных зерен вдоль оси прессования, что объясняется воздействием экструзии (рис. 3).

Анализ полученной микроструктуры позволяет предположить, что упрочнение материала произошло за счет дисперсионного упрочнения и повышения плотности дислокаций, т.к. существенно отличия в форме и размерах зерен не произошло. Как известно, при больших степенях деформации и многократных проходах равноканального углового прессования (РКУП) происходит сильное дробление и наблюдается размытие зерен феррита. При реализации схем кручения с гидростатическим давлением происходит также фрагментация субзеренных блоков, в результате чего наблюдается многократный рост физико-механических характеристик [3].

В данном же случае измельчение структуры позволило повысить прочность 09Г2С в 1,4 раза при снижении пластичности на 38 % (таблица).

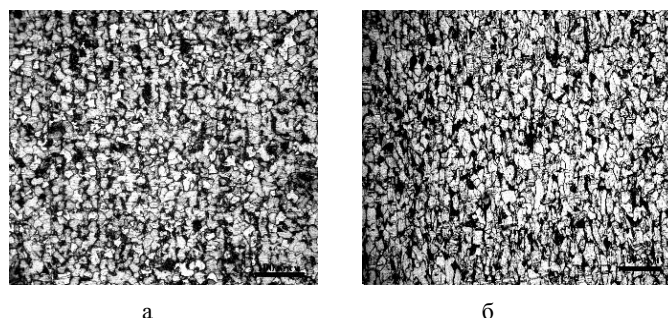


Рис. 3. Микроструктура стали 09Г2С: а – в состоянии поставки; б – после ЭВП в $n=1$ проход при 773 К

Механические характеристики стали 09Г2С в различных состояниях

Состояние материала	σ_r , МПа	σ_b , МПа	δ , %
Исходное (состояние поставки)	361	521	36,65
Экструзия + винтовое прессование в $n=1$ проход при 773 К	645	725	22,65

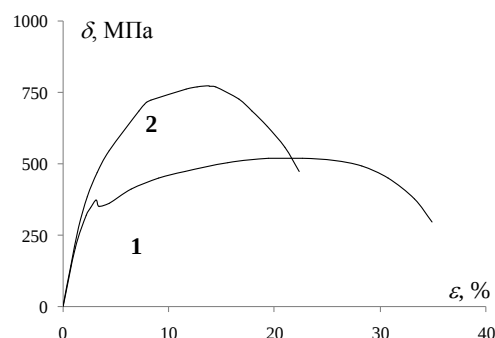


Рис. 4. Диаграммы растяжения стали 09Г2С в различных состояниях: 1 – состояние поставки; 2 – после обработки комбинированием экструзии и винтового прессования в $n=1$ проход при 773 К

Типичные кривые растяжения образцов стали 09Г2С в состоянии поставки и в упрочненном состоянии представлены на рис. 4. Вид кривой деформирования стали 09Г2С после комбинированной обработки качественно соответствует диаграмме деформирования упрочненного металла, например, равноканальным угловым

прессованием. Анализ кривой деформирования показывает, что область упругой деформации стали после упрочнения комбинированным методом увеличилась более чем в 3 раза. Тем самым повышается энергоёмкость разрушения материала на микроуровне, что ранее было показано на образцах, обработанных РКУП, в том числе при низкотемпературных испытаниях [8]. Поэтому следует ожидать повышения хладостойкости обработанных по данной технологии заготовок и изделий. Это должны показать испытания при низких климатических температурах.

Кроме прогнозирования свойств новых материалов, отдельный интерес представляет моделирование процессов интенсивной пластической деформации. В настоящее время моделирование таких процессов производится методами молекулярной динамики и конечно-элементного моделирования в гидродинамическом приближении. При этом модели первого вида ограничены объёмом рассматриваемого материала и идеализированными представлениями о структуре [9], а вторые применимы только в условиях ударно-динамического прессования [10]. Поэтому особый интерес представляют модели, основанные на описании эволюции повреждений в виде дефектов кристаллического строения, таких как дислокации и их скопления, а также роста и коалесценции микропор и микротрещин [11].

Заключение

Разработанный комбинированный метод экструзии и винтового прессования достаточно эффективен для упрочнения металлических материалов и получения профилей.

В результате экструзии и винтового прессования объёмной заготовки из 09Г2С достигнуто повышение предела текучести в 1,8 раз, предела прочности в 1,4 раза и снижение пластичности в 1,6 раз.

Повышение прочности стали 09Г2С связано с дисперсионным упрочнением и повышением плотности дислокаций в результате комбинированной обработки.

Результаты исследования могут быть использованы при разработке технологий упрочнения металлов и сплавов комбинированием экструзии и винтового прессования с получением винтовых профилей.

Исследование выполнено в рамках научного проекта № III.28.1.1 по программе III.28.1 СО РАН.

Литература

1. Сегал В.М., Резников В.И., Копылов В.И. и др. Процессы пластического структурообразования металлов. – Минск: Наука и техника, 1994. – 231 с.
2. Валиев Р.З., Александров И.В. Объёмные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.
3. Бейгельзимер Я.Е., Варюхин В.Н., Орлов Д.В., Сынков С.Г. Винтовая экструзия – процесс накопления деформации. – Донецк: Фирма «ТЕАН», 2003. – 87 с.
4. Пашинская Е.Г., Мышляев М.М., Миронов С.Ю., Варюхин В.Н. Влияние деформации со сдвигом на микроструктуру и механические свойства стали Ст3 // Физика металлов и металловедение. – 2008. – Т. 105, № 1. – С. 86–94.
5. Пашинская Е.Г., Варюхин В.Н., Завдовеев А.В. и др. Возможности метода дифракции обратнорассеянных электронов для исследования структуры деформированной стали // Деформация и разрушение материалов. – 2012. – № 6. – С. 35–40.
6. Завдовеев А.В. Особенности формирования структуры и свойств малоуглеродистой стали при тепловой винтовой экструзии // Физика и техника высоких давлений. – 2013. – Т. 23, № 4. – С. 100–106.
7. Иванов А.М., Петрова Н.Д., Валиев Р.З. и др. Способ комбинированной интенсивной пластической деформации заготовок // Патент 2341345 Рос. Федерация. № 2006111687/02; заявл. 10.04.06; опубл. 20.12.08. Бюл. №35. – 3 с.
8. Лепов В.В., Иванов А.М., Логинов Б.А. и др. Механизм разрушения наноструктурированной стали при низких температурах // Российские нанотехнологии. – 2008. – Т. 3, № 11–12. – С. 149–157.
9. Скоробогатов М.С., Дудник Д.В., Дудник Е.А. Моделирование процесса интенсивной пластической деформации в модельном сплаве Ni₃Al (111) // Ползуновский альманах. – 2011. – № 2. – С. 96–98.
10. Шипачев А.Н., Зелепугин С.А. Моделирование процессов динамического канально-углового прессования // Забавихинские научные чтения: сб. материалов X Международной конференции. – Снежинск: Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2010. – С. 228.
11. Lepov V. Structural evolution model of damage accumulation processes in modern metallic and polymer nanomaterials // World Journal of Engineering. – 2012. – 10(3). – P. 205–212.

Поступила в редакцию 14.09.2015