
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Материаловедение

УДК 539.4.016.2

Физическое моделирование комбинированного процесса экструзии и винтового прессования стали

Н.Д. Коваленко, В.В. Лепов, А.М. Иванов

*Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, Россия
e-mail: nakalykay@mail.ru*

Аннотация. Представлены основы физического моделирования сложных технологических процессов, направленных на получение мелкозернистой структуры материалов с высокими механическими характеристиками. Проведена оценка влияния последующего винтового прессования на процесс экструзии призматических и винтовых профилей из низколегированной стали 09Г2С, применяемой для ответственных конструкций в условиях криолитозоны Якутии. На основе фрактограмм изломов образцов дан качественный анализ причин повышения прочности и снижения пластичности обработанной стали в результате указанного комбинированного воздействия. Установленный вязкий характер разрушения образцов после экструзии и винтового прессования характеризуется более высокой степенью развития ямочного микрорельефа по сравнению с исходным материалом. Полученные закономерности позволяют разработать рекомендации по дальнейшему совершенствованию как экспериментальных исследований в области интенсивной деформации, так и технологии упрочнения в целом.

Ключевые слова: физическое моделирование, интенсивная пластическая деформация, экструзия, винтовое прессование, низколегированная сталь, прочность, пластичность, фрактограмма, излом образца, механизм разрушения.

Благодарности: исследование выполнено в рамках научного проекта № III.28.1.1 по программе III.28.1 СО РАН.

Physical Modeling of Extrusion and Screw Press Processing Technology for Steel

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

*Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk, Russia
e-mail: nakalykay@mail.ru*

Abstract. The basics of physical modeling of complex processing technology for manufacturing of ultrafine-grained structure for high-strength materials has been delivered in the paper. The screw press process influence on extrusion process of prismatic and spiral shaped lean steel probes has been presented. This steel 09G2S is widely used for vital structures in permafrost regions of Central Yakutia. On the base of frac-

КОВАЛЕНКО (Петрова) Нюргюяна Дмитриевна – м.н.с.; ЛЕПОВ Валерий Валерьевич – д.т.н., акад. АН РС (Я), зам. директора; ИВАНОВ Афанасий Михайлович – к.т.н., в.н.с.

tograms of probe breaks the reasons of high strength and low plasticity of processed steel have been qualitatively interpreted. The ductile fracture mechanism of processed steel probes after the extrusion and screw pressing is characterized by more pronounced of surface microrelief against the initial material. The regularities ascertained in such a modeling allows to approach for further improvement as in the severe plastic deformation experimental research, as in the combine hardening technology on the whole.

Key words: physical modeling, severe plastic deformation, extrusion, screw press, lean steel, strength, plasticity, fractography, probe break, fracture mechanism.

Acknowledgments: the study was performed within the framework of the scientific project No. III.28.1.1 of program III.28.1 of the SB RAS.

Введение

Трудно переоценить важность физического и численного моделирования перспективных промышленных технологий, обеспечивающих многократное повышение эксплуатационных характеристик изделий. Особенно значимые результаты удаётся достичь при сочетании таких технологий, например, как термообработка и интенсивная пластическая деформация. Существуют различные способы и устройства реализации пластической деформации для обработки металлических материалов. Так, в промышленности наибольшее распространение получили методы прессования, прокатки и волочения. Экструзия также является одним из известных и хорошо отработанных методов деформационной обработки материалов путём продавливания и выталкивания и традиционно применяется для полимерных материалов, однако в последнее десятилетие успешно используется и для металлических материалов – сталей, титановых сплавов, меди и др. [1–4]. При этом удаётся экструдировать заготовки как из однородных, так и из спеченных композиционных и порошковых материалов.

В кратком обзоре современных исследований процесса винтовой экструзии, представленном авторами ранее [5], вошёл новый комбинированный метод экструзии и винтового прессования. В основу разработанного метода был положен запатентованный способ комбинированной интенсивной пластической деформации заготовок [6]. Исследования показывают, что винтовая экструзия, кроме эффективного измельчения микроструктуры, обеспечивает также выравнивание концентрации легирующих элементов [7], что позволяет говорить и об измельчении микродефектов, и таким образом, о повышении климатической и динамической трещиностойкости (хладостойкости).

В настоящей работе в качестве дальнейшей апробации метода выполнен физический эксперимент по оценке влияния последующего винтового прессования на процесс экструзии заготовок из низколегированной стали 09Г2С. Исследованы механические свойства, деформируемость и характер разрушения получаемых стальных образцов.

Материалы и методика исследований

Прессование заготовок осуществлялось на созданных устройствах с использованием гидравлического пресса «ПСУ 125» типа ЗИМ усилием 1250 кН. Используемая схема экструдирования (рис. 1, а) обеспечивает соотношение входного поперечного сечения к выходному как ~1,77:1. В схеме экструзии с винтовым прессованием (ЭВП) дополнительно к экструзии предусмотрено винтовое кручение (рис. 1, б). После сужения канала с $3,14 \times 6 \text{ мм}^2$ до $8 \times 8 \text{ мм}^2$ заготовка подвергается правому винтовому вращению в канале длиной 12 мм. При этом угол конуса составляет $22^\circ 38'$, а угол наклона винтовой линии – 10° . Заготовка с поперечным призматическим сечением размером $\varnothing 8 \times 8 \text{ мм}$ вращается по правой винтовой линии с шагом 32 мм на угол 90° . Схема для ЭВП была создана на основе изобретения [6, 7] с техническими решениями, позволяющими её реализовать. Использовалась технологическая смазка «РОСОЙЛ-АНГЕЛИНА» с добавками чешуйчатого графита для уменьшения трения между поверхностью заготовки и стенками канала матрицы.

Объект исследования – низколегированная сталь 09Г2С в состоянии поставки, после экструзии и комбинированной обработки по схеме «ЭВП». Химический состав стали 09Г2С (%):

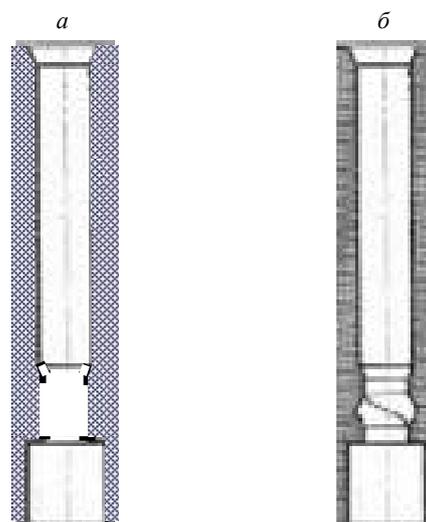


Рис. 1. Схемы экструзии (а) и экструзии с винтовым прессованием (б)

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)».

Предварительно подогретая в муфельной печи до 673 К объемная заготовка из 09Г2С помещается в специальную технологическую оснастку с той или иной схемой реализации деформации. В оснастке с помощью накидной печи поддерживается температура 673 К. В качестве смазки для уменьшения трения поверхности заготовки об стенки канала матрицы используется технологическая смазка «РОСОЙЛ-АНГЕЛИНА» с добавками чешуйчатого графита. Экструдированию и ЭВП в 1 проход подвергались заготовки из стали 09Г2С размером $\varnothing 11,7 \times 40$ мм, которые были изготовлены из прутка диаметром 20 мм. Максимальное усилие при экструдировании и ЭВП стальной заготовки не превысило 15 кН.

Механические испытания на одноосное растяжение образцов с рабочим размером $\varnothing 3 \times 15$ мм проводили на испытательных машинах INSTRON-1195 (при 293 К) и UTS-20k (при 213 К) при постоянной скорости нагружения, равной $\approx 3,33 \cdot 10^{-5}$ м·с⁻¹. Образцы из упрочненных сталей для механических испытаний изготавливали из средней части заготовок.

Фрактографические исследования изломов образцов выполняли на сканирующем электронном микроскопе HITACHI TM3030 в режиме вторичных электронов.

Результаты и обсуждение

Полученные в результате деформационной обработки заготовки представлены на рис. 2. Суммарная степень деформации при комбинировании экструзии и винтового прессования составила 0,43 в центре и 0,78 на краю винтового поперечного сечения, поскольку при винтовом прессовании в центре сечения $\Lambda=0$, а на краю $\Lambda=0,35$ [8].



Рис. 2. Исходная заготовка (а), заготовки после экструзии (б), заготовка после ЭВП (в)

Экструзия и ЭВП привели к повышению прочности стали 09Г2С (таблица). Предел текучести в результате экструзии и ЭВП повысился в 2 раза, а предел прочности – в 1,5 раза. Если сравнить данные по механическим характеристикам для режимов «Экструзия» и «ЭВП», то из таблицы видно, что они практически на одинаковом уровне.

Характеристики прочности стали 09Г2С в различных состояниях при температуре 293 К

Режим обработки	σ_t , МПа	σ_b , МПа
Исходное состояние – состояние поставки	361	521
Экструзия, $T=673$ К, $n=1$	759	770
ЭВП, $T=673$ К, $n=1$	754	793

Как видно из диаграмм растяжения, для экструдированной стали сохраняется зуб текучести так же, как и для материала в исходном состоянии, но в меньшей степени, тогда как для стали, подвергнутой ЭВП, он исчезает (рис. 3). Такое поведение кривой деформирования может свидетельствовать о том, что в материале после экструзии сохраняется возможность возникновения резкой текучести, но в меньшей степени, чем для исходного состояния [9].

Из анализа фрактограмм изломов образцов из низколегированной стали 09Г2С в [10] видно, что макро- и микрорельефы изломов образцов в исходном состоянии и в состоянии после ЭВП практически идентичны. Было показано, что наблюдается вязкое разрушение с образованием «чашечного» излома в шейке растянутого образца и наличие ямочного микрорельефа.

Структура поверхности разрушения образца из экструдированной стали 09Г2С также матовая, неровная, видны две основные зоны (рис. 4, а). Центральная волокнистая зона 1, как известно, включает очаг разрушения и участок развития трещины. Наклонный срез в зоне 2 образован за

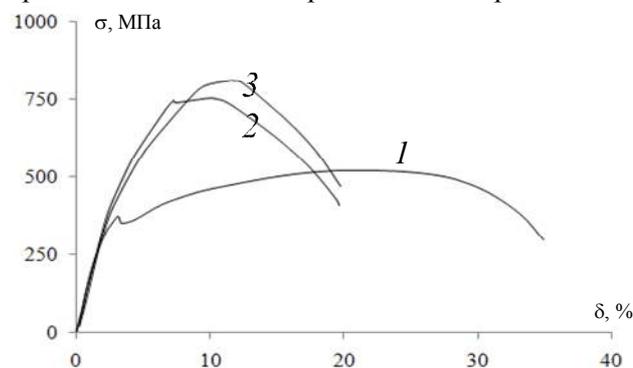


Рис. 3. Диаграммы растяжения образцов из стали 09Г2С в исходном состоянии (1), в состояниях после экструзии (2) и ЭВП (3)

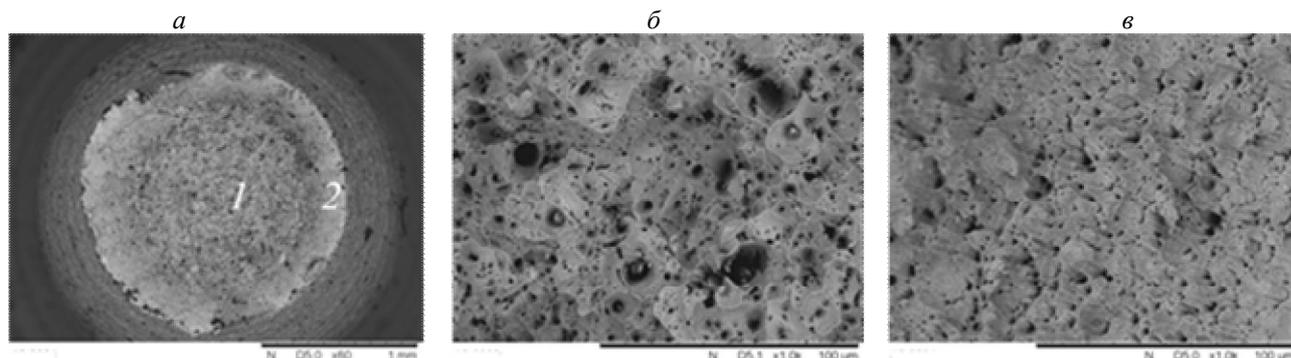


Рис. 4. Макро- и микрорельеф излома образца из стали 09Г2С после экструзии в 1 проход при 673 К (а, $\times 60$), в зоне 1 (б, $\times 1000$), в зоне 2 (в, $\times 1000$)

счет действия касательных напряжений. Для экструдированного образца зона 1 образования и развития трещины составляет так же, как для исходного и подвергнутого ЭВП образца, порядка 70 % общей площади поверхности разрушения.

Ямки разрушения в волокнистой зоне 1 и ямки сдвига в зоне 2 среза свидетельствуют о стабильном росте трещины. Микрорельеф поверхности разрушения экструдированного образца как качественно, так и по размерам ямок схож с микрорельефом для образца, подвергнутого ЭВП. Квазиравноосные ямки нормального отрыва, разделенные гребнями с острыми краями, в зоне 1 образовались в результате слияния микропор (рис. 4, б). Наблюдаемые в некоторых ямках частицы могут быть включениями. На гребнях больших ямок от включений отмечают как отдельные, так и выстроенные в цепочку мелкие ямки диаметром $\sim 0,5$ мкм, что наблюдалось и в волокнистой зоне разрушенного образца, подвергнутого ЭВП. Расположенные на внутренней поверхности ямок волнистые линии (ступеньки), как известно, свидетельствуют о скольжении материала при их увеличении. В волокнистой зоне 1 излома образца, подвергнутого экструзии в один проход при 673 К, размеры ямок сопоставимы с размерами ямок для случая с ЭВП, но больше, чем для исходного состояния. Как было замечено в монографии [8], согласно работе [11], данное обстоятельство свидетельствует о меньшем числе мест зарождения микропор в деформированном кристалле.

Вытянутые ямки сдвига (рис. 4, в) характеризуют разрыв образца по периферии срезом вдоль полос сдвига. Присутствующие в зонах 1 (разрыв перемычек отрывом) и 2 (разрушение срезом) микроямки характерны для режимов обработки экструзией и ЭВП. Вид зоны среза и вытянутость ямок идентичны случаю разрушенного образца, подвергнутого ЭВП. Качественно можно судить о том, что энергоёмкость процесса развития трещины в зоне 2 для экс-

трудированного образца из стали 09Г2С сопоставима со значениями этой характеристики в случае ЭВП.

Что касается построения математической и численной модели процесса экструзии, в частности, винтовой, то такие попытки предпринимались как для оптимизации геометрии технологической оснастки [12–13], так и для оценки поврежденности металла в процессе интенсивной пластической деформации [14]. Для построения уравнений используется подход механики сплошных сред, а в качестве метода дискретизации выбирается метод конечного элемента, однако во всех случаях принимаемые ограничения и приближения решений ставят под сомнение ценность получаемых результатов. Полная система уравнений для изотропных несжимаемых сред [13] не предусматривает решения механической задачи, изотермическая постановка – теплообмена образца с оснасткой, а возникновение трещин, наблюдаемое в ходе физических экспериментов, нарушает условие неразрывности, лежащее в основе всех рассматриваемых постановок. Поэтому представляется необходимым выбор многомасштабной структурной модели на основе подхода клеточных автоматов на макроуровне и стохастической постановки на микроуровне [15] с использованием результатов физического моделирования.

Выводы

1. Как процесс экструзии, так и ЭВП в один проход при температуре 673 К обеспечили повышение прочности стали 09Г2С практически одинакового порядка – в 1,5 раза.

2. Во всех состояниях материала (исходное, после экструзии и ЭВП) наблюдается вязкое разрушение образцов при одноосном статическом растяжении в условиях комнатной температуры. Макро- и микрорельефы изломов образцов в исходном состоянии и в состояниях после экструзии и ЭВП в один проход качественно имеют схожий характер. В свою оче-

редь, поверхности разрушения образцов для экструдированной и подвергнутой ЭВП стали 09Г2С практически идентичны.

3. Практически одинаковый уровень прочности стали 09Г2С после упрочнения экструзией и ЭВП, а также идентичность механизма разрушения образцов при нагружении растяжением, по-видимому, связаны с тем, что обработка выполнена только в один проход и образцы были изготовлены из средней части упрочненных заготовок. Как было отмечено, в центральной части поперечного сечения образца степень деформации определяется в основном экструзией.

Литература

1. Шаталов Р.Л. История и философия металлургии и обработки металлов. М.: Теплотехника, 2011. 396 с.
2. Моисеев Н.В., Некрасов Б.Р., Выдумкина С.В. Энергоэффективная технология получения длинномерных полуфабрикатов методом изотермической экструзии из конструкционных титановых сплавов ВТ6, ВТ16 // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2015. №8. С. 35–38.
3. Schwartz M., Ciocoiu R., Gheorghe D., Ciuca I. Failures of AISI H21 die in copper hot extrusion // Materials at High Temperatures. 2014. V. 31, no. 2. P. 95–101.
4. Ivanisenko Yu., Kulagin R., Fedorov V., Mazilkin A., Scherer T., Baretzky B., Hahn H. High Pressure Torsion Extrusion as a new severe plastic deformation process // Materials Science and Engineering A. 2016. V. 664. P. 247–256.
5. Иванов А.М., Петрова Н.Д., Лепов В.В. Влияние экструзии и винтового прессования на структуру и механические свойства низколегированной стали // Наука и образование. 2015. №4. С. 87–90.
6. Иванов А.М., Петрова Н.Д., Валиев Р.З., Рааб Г.И., Павлов В.В. Способ комбинированной интенсивной пластической деформации заготовок: Пат. 2341345 Рос. Федерация. № 2006111687/02; заявл. 10.04.2006; опубл. 20.12.2008. Бюл. №35. 3 с.
7. Иванов А.М., Рааб Г.И., Петрова Н.Д. Способ комбинированной интенсивной пластической деформации заготовки: Пат. 2570271 Рос. Федерация. № 2014133400/02; заявл. 13.08.2014; опубл. 10.12.2015. Бюл. №34. 5 с.
8. Бейгельзимер Я.Е., Варюхин В.Н., Орлов Д.В., Сынков С.Г. Винтовая экструзия – процесс накопления деформации. Донецк: Фирма ТЕАН, 2003. 87 с.
9. Иванов А.М. Термопластическое упрочнение конструкционных сталей // Деформация и разрушение материалов. 2012. № 2. С. 31–35.
10. Иванов А.М. Упрочнение низколегированной стали комбинированием экструзии, винтового и равноканального углового прессования // Вестник машиностроения. 2017. № 2. С. 81–83.
11. Ярополова Н.Г. Влияние слабого магнитного поля на пластическую деформацию меди: Автореф. дис. ... к.т.н. Новокузнецк, 2015. 20 с.
12. Павленко Д.В. Методика оптимизации канала матриц для винтовой экструзии // Журнал инженерных наук. 2015. Т.2, № 1. С.В 8–В 15.
13. Проектирование экструзионных машин с учетом качества резинотехнических изделий / М.В. Соколов, А.С. Клинков, П.С. Беляев, В.Г. Однолько. М.: Машиностроение-1, 2007. 292 с.
14. Боткин А.В., Валиев Р.З., Кубликова А.А., Вареник Е.В. Математическое моделирование поврежденности металла в процессе интенсивной пластической деформации длинномерной заготовки равноканальным угловым прессованием по схеме конформ // Materials Physics and Mechanics. 2015. Т. 24, № 3. С. 266–277.
15. Lepov V.V., Grigorev A.S., Achikasova V.S., Lepova K.Ya. Some aspects of structural modeling of damage accumulation and fracture processes in metal structures at low temperature // Modelling and Simulation in Engineering. 2016. ID 7178028. URL: <https://www.hindawi.com/journals/mse/2016/7178028/>.

Поступила в редакцию 26.10.2017