

УДК 539.4.016.2

DOI: 10.30987/article\_5db95e85a4a413.79050731

А.М. Иванов

## КОМБИНИРОВАНИЕ МЕТОДОВ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрены комбинированные методы деформационной обработки металлических материалов. Представлен комбинированный метод экструзии и равноканального углового прессования (РКУП), выполняемых последовательно. Описано упрочнение низколегированной стали 09Г2С с использованием экструзии и РКУП. Представлены

данные по механическим свойствам и анализ механизма разрушения образцов из стали 09Г2С в состоянии поставки и после упрочнения.

**Ключевые слова:** сталь, деформационная обработка, экструзия, равноканальное угловое прессование, РКУП, прочность, пластичность, фрактография, механизм разрушения.

А.М. Ivanov

## COMBINING OF MATERIAL STRAIN PROCESSING METHODS

The purpose of the work consists in the investigation of stress-strain properties and destruction mechanism of low-alloy steel 09G2S subjected to extrusion and uniformly channel angular pressing (UCAP). The combined method of

Strain processing consists in the successive use of extrusion methods and UCAP. There is shown an example of low-alloy steel 09G2S strengthening with the use of extrusion and UCAP. There are presented data on stress-strain properties and destruction mecha-

nism of steel 09G2S samples at uniaxial tension at the state of delivery and after strengthening. Strength increase and steel plasticity decrease is shown. On the basis of the results of fractal graphics analysis a viscous character of steel 09G2S destruction at the state of delivery and after extrusion and UCAP is defined.

**Key words:** steel, strain processing, extrusion, uniformly channel angular pressing, UCAP, strength, ductility, fractal graphics, strain mechanism.

### Введение

Проблема эффективного повышения прочности металлов и сплавов, используемых при изготовлении изделий и деталей различной техники, приводит к разработке комбинированных методов деформационной обработки. При этом предусматривается использование механических методов обработки в различной комбинации и последовательности. Зачастую они применяются в комбинации с термической обработкой. С развитием методов интенсивной пластической деформации (ИПД) [1-9] перспективным направлением становится разработка комбинированных методов [10; 11]. Преимущество комбинированных методов заключается в более широкой возможности достижения высоких показателей физико-механических свойств материалов варьированием методов обработки. Кроме того, в результате комбинированной обработки появляется возможность получать упрочненные заготовки, отличающиеся по форме от исходной заготовки, то есть сложного профиля, а также полу-

фабрикаты, максимально подобные изделию.

В работе [10] рассматривается возможность канального углового прессования тонкой металлической пластины. Результатом обработки по специальной схеме является получение упрочненной профилированной пластины. Примеры прессования призматических и винтовых профилей из меди, суперинвара и стали представлены в [11-13]. В этих работах комбинированная интенсивная пластическая деформация реализуется в одном устройстве во время одного технологического процесса.

Методы упрочнения могут применяться отдельно, в разной последовательности и с разным временным интервалом. В [14] для упрочнения низкоуглеродистой стали СтЗсп используется комбинация методов в следующей последовательности: РКУП и экструзия.

Цель настоящей работы заключается в исследовании механических свойств и

механизма разрушения низколегированной стали 09Г2С, подвергнутой экструзии и РКУП.

Использование двух и более методов деформационной обработки, в частности экструзии перед РКУП, которое обеспечивает более высокую степень деформации, во-первых, представляет научный интерес с точки зрения изучения влияния предварительного измельчения структуры с применением менее интенсивной пластической деформации за счет экструзии на

### Материал и методика исследований

Исследуемый материал - низколегированная конструкционная сталь марки 09Г2С (в %: 0,12 С; 0,008 N; 0,5-0,8 Si; 0,035 P; 0,04 S; 0,3 Cr; 1,3-1,7 Mn; 0,3 Ni; 0,3 Cu; 0,08 As; остальное - Fe). Химический анализ проведен на атомно-эмиссионном спектрометре «Foundry-Master» фирмы «Worldwide Analytical Systems AG (WASAG)».

Комбинированная деформационная обработка объемной заготовки из стали 09Г2С выполнялась по следующей схеме. Вначале объемная заготовка размером  $\varnothing 11,8 \times 40$  мм из стали 09Г2С подвергалась экструзии в один проход при температуре 673 К. При экструдировании объемная заготовка вставляется во входной канал  $\varnothing 12$  мм, затем проходит через сужающийся участок с углом конуса  $34^\circ$ , а в последующем выпрессовывается в выходной канал квадратного сечения  $8 \times 8$  мм. Затем выполнялось РКУП составной заготовки  $\varnothing 19,8 \times 60$  мм в один проход при той же температуре, что и экструзия. Составная заготовка изготавливается следующим образом. Из экструдированной заготовки квадратного сечения изготавливается другая заготовка размером  $\varnothing 6 \times 50$  мм, которую впрессовывают во втулку размером  $6/19,8 \times 50$  мм из такого же материала. Экструзию и РКУП выполняли на гидравлическом прессе ПСУ 125 типа ЗИМ с макси-

свойства материала после комбинированного воздействия двумя и большим количеством методов обработки и, во-вторых, имеет практическое значение для отработки подходов к комбинированию методов деформационной обработки для получения составных заготовок и полуфабрикатов деталей сложного профиля.

Полученные результаты могут быть полезны при анализе механизмов разрушения сталей, обработанных комбинированной деформационной обработкой.

мальным усилием 1250 кН с помощью специальных оснасток. При этом после экструдирования меняли оснастку на оснастку для РКУП. До деформационной обработки заготовка предварительно нагревалась и выдерживалась в муфельной печи до температуры 673 К, затем помещалась в технологическую оснастку, нагретую до 673 К с помощью накидной печи. Для уменьшения трения поверхности заготовки о стенки канала матрицы использовали технологическую смазку РОСОЙЛ-АНГЕЛИНА с добавками чешуйчатого графита. Используемые оснастки обеспечивали степень деформации 0,4 при экструзии и 0,64 при РКУП.

Для механических испытаний на одноосное растяжение изготавливали образцы из исходной и упрочненной стали. Цилиндрические образцы с рабочим участком размером  $\varnothing 2 \times 10$  мм испытывали на одноосное растяжение на машине UTS-20k фирмы «UTS TestSysteme GmbH» (Lammerweg 29.D-89079 Ulm, Германия) при постоянной скорости нагружения  $\approx 3,33 \cdot 10^{-5}$  м·с<sup>-1</sup> в условиях комнатной температуры.

Исследования изломов образцов были выполнены методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на сканирующем электронном микроскопе HITACHI TM3030 (Япония) в режиме вторичных электронов.

### Результаты исследований и их обсуждение

Из представленных в таблице результатов механических испытаний видно, что предел текучести и предел прочности в ре-

зультате деформационной обработки повысились. После экструзии и РКУП предел текучести стали 09Г2С повысился в 2,2

раза ( $\sigma_T = 769$  МПа по сравнению с  $\sigma_T = 520$  МПа в исходном состоянии), а предел прочности - в 1,5 раза (786 МПа после упрочнения против 520 МПа в исходном

состоянии). Пластичность снизилась практически в 2 раза ( $\delta_k = 14,89$  % по сравнению с 31,02 % для исходного состояния).

Таблица

Характеристики прочности стали 09Г2С

№	Состояние стали	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_k$ , %
1	Состояние поставки	352	520	31,02
2	Экструзия (673 К, $n=1$ ) + РКУП (673 К, $n=1$ )	769	786	14,89

Разрушение образцов из 09Г2С при температуре 293 К показало следующее. Макро- и микрорельефы изломов образцов в исходном состоянии и в состоянии после экструзии и РКУП качественно идентичны. Макрорельеф поверхности разрушения образцов из стали 09Г2С при 293 К характеризует вязкое разрушение с образованием чашечного излома в шейке растянутого образца с утяжкой в зоне локализации деформации и с образованием губ среза. Изломы характеризуются наличием ямочного микрорельефа. Структура поверхности разрушения матовая, видны две основные зоны. Очаг разрушения и участок развития трещины занимают центральную волокнистую зону. Наклонный срез, образовавшийся от действия касательных напряжений, расположен по периметру излома. Для образца в исходном состоянии центральная волокнистая зона - зона образования и развития трещины - составляет примерно 90 % от общей площади поверхности разрушения. Для образца после экструзии и РКУП эта зона уменьшается до ~75 %.

Из сравнения микрофрактограмм (рисунок) видно, что для образца из упрочненной стали 09Г2С с измельченной структурой размеры ямок на изломе меньше, чем для образца из стали в исходном состоянии. О стабильном росте трещины при разрушении образцов свидетельствуют ямки разрушения в волокнистой зоне и ямки сдвига в зоне среза.

В центральной части изломов

образцов вязкое разрушение характеризуется наличием квазиравноосных ямок нормального отрыва, разделенных гребнями с острыми краями (рисунки а, в). Колебания размеров включений и зерен отражаются в широком диапазоне размеров ямок в изломах. Волнистые линии на внутренних стенках ямок свидетельствуют о скольжении материала при росте ямок. Остатки частиц внутри некоторых ямок в изломе образца из стали 09Г2С в исходном состоянии являются раздробленными в результате пластической деформации и вследствие хрупкости неметаллическими включениями, преимущественно оставшимися после раскисления стали (рисунок а), а в ямках для упрочненной стали сохранились в целости более мелкие частицы (рисунок в). Размеры ямок в центральной зоне на поверхности разрушения образца из стали 09Г2С в исходном состоянии доходят до 12–25 мкм (рисунок а), в то время как для упрочненной стали максимальные размеры ямок составляют порядка 7–20 мкм (рисунок в). В изломе упрочненной стали присутствует большее количество микроямок, нежели в исходном образце. На внутренних стенках отдельных ямок имеются микроямки, которые, по-видимому, появились в процессе роста ямок скольжением материала. Видны разрывы перемычек между микроямками и ямками.

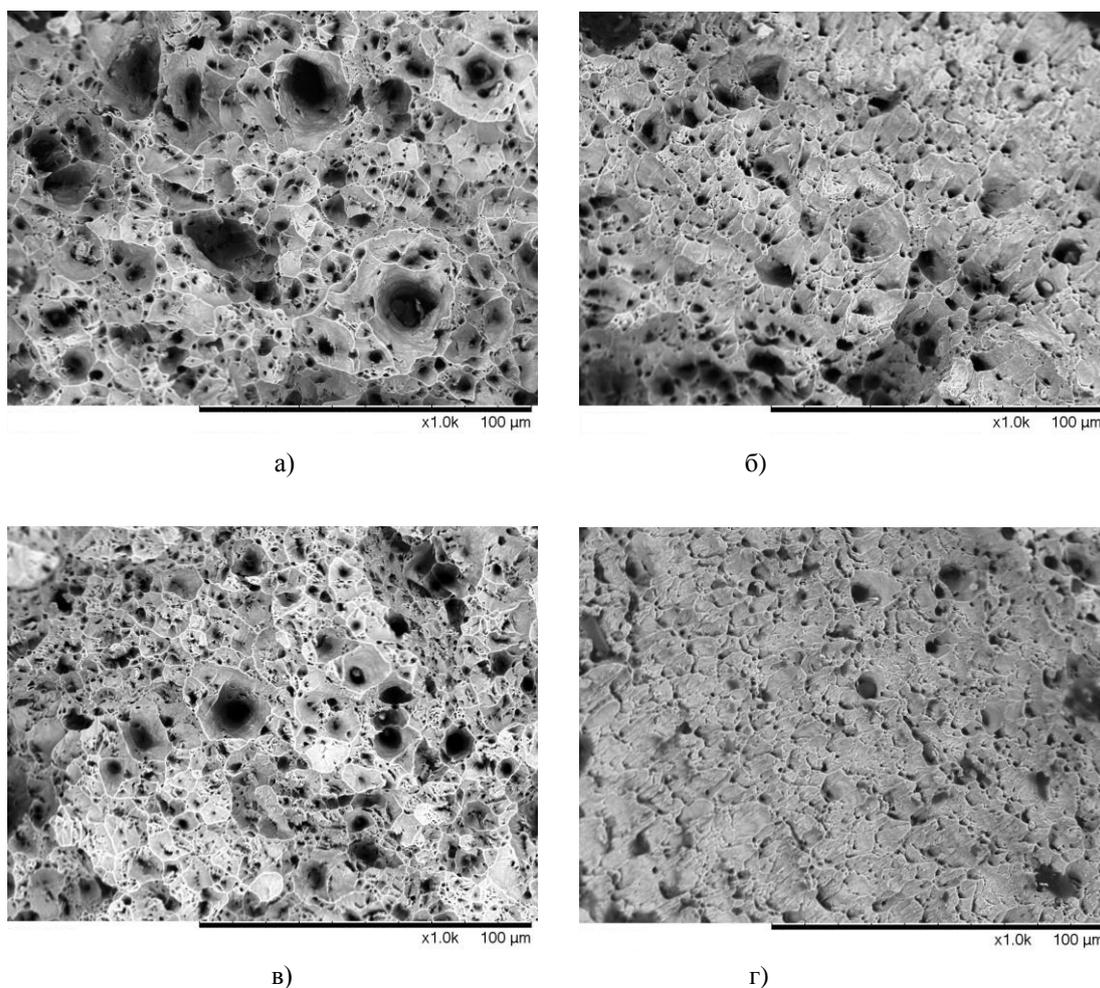


Рис. Микрорельефы изломов образцов из стали 09Г2С, испытанных при нормальной температуре в состоянии поставки: а - центральная зона, б - периферийная зона; после экструзии и РКУП в один проход при 673 К: в - центральная зона, г - периферийная зона

В зоне губ среза излома образца вытянутые ямки сдвига сформированы в результате действия касательных напряжений (рисунки б, г). Разница в размерах и количестве ямок наблюдается и для зоны среза, как и в случае центральной зоны.

Таким образом, разрушение цилиндрических образцов из

низколегированной стали 09Г2С в состоянии поставки и после упрочнения посредством экструзии и РКУП в один проход имеет вязкий характер. Вязкое разрушение происходит с образованием чашечного излома, который состоит из двух основных зон: волокнистой зоны образования и медленного роста трещины, и зоны среза.

## Выводы

1. Использование комбинации методов экструзии и РКУП в один проход обеспечило повышение предела текучести низколегированной стали 09Г2С в 2,2 раза, а предела прочности - в 1,5 раза. При этом пластичность снизилась в 2 раза. Причинами повышения прочностных характеристик стали в основном являются такие факторы, как измельчение зерен, повыше-

ние плотности дислокаций и уменьшение параметра кристаллической решетки.

2. Разрушение образцов из стали 09Г2С при их одноосном растяжении в условиях нормальной температуры в обоих случаях (состояние поставки и после экструзии и РКУП) происходит по вязкому механизму с образованием чашечного излома.

Работа выполнена в рамках научного проекта № III.28.1.1 Программы № III.28.1 фундаментальных исследований Сибирского отделения РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сегал, В.М. Развитие обработки материалов интенсивной сдвиговой деформацией / В.М. Сегал // *Металлы*. – 2004. – № 1. – С. 5-14.
2. Валиев, Р.З. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства / Р.З. Валиев, И.В. Александров. – М.: Академкнига, 2007. – 398 с.
3. Zhu, Y.T. A new route to bulk nanostructured metals / Y.T. Zhu, H. Jiang, J. Huang // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2001. – V. 32. – № 6. – P. 1559-1562. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-001-0245-0>.
4. Сэстри, Ш.М.Л. Формирование субмикроструктурной структуры в стали 10Г2ФТ при холодном равноканальном угловом прессовании и последующем нагреве / Ш.М.Л. Сэстри, С.В. Добаткин, С.В. Сидорова // *Металлы*. – 2004. – № 2. – С. 28-35.
5. Лотков, А.И. Формирование ультрамелкозернистого состояния, мартенситные превращения и неупругие свойства никелида титана после «abs»-прессования / А.И. Лотков, В.Н. Гришков, Е.Ф. Дударев [и др.] // *Вопросы материаловедения*. – 2008. – № 1 (53). – С. 161-165.
6. Stolyarov, V.V. Features of deformation behavior at rolling and tension under current in TiNi alloy / V.V. Stolyarov // *Reviews on Advanced Materials Science*. – 2010. – V. 25. – № 2. – P. 194-202.
7. Li, L. Ultrahigh strength steel wires processed by severe plastic deformation for ultrafine grained microstructure / L. Li, J. Virta // *Materials Science and Technology*. – 2011. – V. 27. – № 5. – P. 845-862. – DOI: [10.1179/026708310X12677993662087](https://doi.org/10.1179/026708310X12677993662087).
8. Maier, G.G. Annealing behavior of ultrafine grained structure in low-carbon steel produced by equal channel angular pressing / G.G. Maier, E.G. Astafurova, H.J. Maier // *Materials Science and Engineering A*. – 2013. – V. 581. – № 1. – P. 104-107.
9. Яковлева, С.П. Структура, свойства и особенности разрушения низколегированной стали в субмикроструктурном состоянии / С.П. Яковлева, С.Н. Махарова, М.З. Борисова // *Металлы*. – 2006. – № 4. – С. 71-78.
10. Иванов, А.М. Канальное угловое прессование медной пластины / А.М. Иванов, Н.Д. Петрова, С.С. Ващенко // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2011. – № 4/2 (288). – С. 56-60.
11. Ivanov, A.M. Pressing Prismatic and Screw Profiles from Copper M4 / A.M. Ivanov // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. – 2017. – V. 58. – № 4. – P. 383-388. – DOI: <https://doi.org/10.3103/S106782121704006X>.
12. Иванов, А.М. Механические свойства, закономерности деформирования и механизм разрушения суперинвара, подвергнутого деформационной обработке комбинированным методом / А.М. Иванов // *Перспективные материалы*. – 2017. – № 9. – С. 72-80.
13. Ivanov, A.M. Strengthening of Low-Alloy Steel by Extrusion, Helical Pressing, and Equal-Channel Angular Pressing / A.M. Ivanov // *Russian Engineering Research*. – 2017. – V. 37. – № 5. – P. 420-423. – DOI: [10.3103/S1068798X17050124](https://doi.org/10.3103/S1068798X17050124).
14. Иванов, А.М. Равноканальное угловое прессование и экструзия низкоуглеродистой стали / А.М. Иванов // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. – 2018. – Т. 23. – № 1. – С. 60-66.

10. Ivanov, A.M. Channel angular pressing of copper plate / A.M. Ivanov, N.D. Petrova, S.S. Vashchenkov // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. – 2011. – No.4/2 (288). – pp. 56-60.
11. Ivanov, A.M. Pressing Prismatic and Screw Profiles from Copper M4 / A.M. Ivanov // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. – 2017. – V. 58. – № 4. – P. 383-388. – DOI: <https://doi.org/10.3103/S106782121704006X>.
12. Ivanov, A.M. Stress-strain properties, regularities of deformation and mechanism of destruction of superinvar subjected to deformation processing by combined method / A.M. Ivanov // *Promising Materials*. – 2017. – No.9. – pp. 72-80.
13. Ivanov, A.M. Strengthening of Low-Alloy Steel by Extrusion, Helical Pressing, and Equal-Channel Angular Pressing / A.M. Ivanov // *Russian Engineering Research*. – 2017. – V. 37. – № 5. – P. 420-423. – DOI: 10.3103/S1068798X17050124.
14. Ivanov, A.M. Uniformly channel angular pressing and extrusion of low-alloy steel / A.M. Ivanov // *Natural resources of Arctic and Subarctic*. – 2018. – Vol.23. – No.1. – pp. 60-66.

Ссылка для цитирования:

Иванов, А.М. Комбинирование методов деформационной обработки материалов / А.М. Иванов // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2019. – № 10. – С. 19 – 24. – DOI: 10.30987/article\_5db95e85a4a413.79050731

Статья поступила в редакцию 21.10.19

Рецензент: д.т.н., профессор Института материаловедения  
Хабаровского научного центра  
Дальневосточного отделения РАН,  
член редсовета журнала «Вестник БГТУ»  
Химухин С.Н.

Статья принята к публикации 23. 10. 19.

#### Сведения об авторах:

**Иванов Афанасий Михайлович**, к.т.н., ведущий научный сотрудник ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН», Институт физико-технических

проблем Севера им. В.П. Ларионова, e-mail: iam53@mail.ru.

**Ivanov Afanasy Mikhailovich**, Can. Sc. Tech., Leading research assistant, FIC “Yakutsk Scientific Center

SB RAS”, Larionov Institute of Physical-Engineering problems of North, e-mail: [iam53@mail.ru](mailto:iam53@mail.ru).