

## КОМБИНИРОВАНИЕ МЕТОДОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛЕЙ

© 2012 А.М. Иванов

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН,  
г. Якутск

Поступила в редакцию 21.03.2012

Рассматриваются вопросы упрочнения стали комбинированием методов интенсивной пластической деформации. Показана эффективность упрочнения стали сочетаниемковки и равноканального углового прессования.

Ключевые слова: *интенсивная пластическая деформация, равноканальное угловое прессование, ковка, прочность, сталь*

Одним из важных направлений современного материаловедения, наряду с созданием новых материалов, является улучшение служебных свойств существующих материалов. Для этих целей применяются различные методы. Широкое применение получили методы термопластической обработки [1-5 и др.]. В работе [6] рассмотрены свойства стали, претерпевшей термическую обработку, и описываются особенности влияния холодной и горячей деформации на величину зерна. В работе [7], в которой использованы традиционные методы термопластической обработки, показано, что наиболее благоприятное влияние на механические свойства стали Ст3 оказывает механико-термическая обработка (МТО) по режиму: пластическая деформация растяжением на 6% при температуре 773 К с последующей выдержкой при этой температуре в течение 20 ч. В последнее время перспективные позиции завоевывают методы интенсивной пластической деформации (ИПД), в том числе равноканальное угловое прессование (РКУП) [8, 9]. Для более эффективного управления структурой материала, а значит и его свойствами, перспективно сочетание различных методов. Представляет интерес комбинация различных методов ИПД, что может привести к более эффективному измельчению структуры, улучшению технологических и физико-механических свойств материалов.

**Цель работы:** исследование одного из вариантов комбинации способов ИПД –ковки и РКУП для повышения прочности сталей.

---

*Иванов Афанасий Михайлович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник. E-mail: a.m.ivanov@iptpn.yzn.ru*

### Материал и методика исследования.

Исследована конструкционная низколегированная сталь 09Г2С (0,12% С; 0,5-0,8% Si; 0,3% Cr; 1,3-1,7% Mn; 0,3% Ni; 0,3% Cu, остальное Fe). Химический анализ проведен на атомно-эмиссионном спектрометре «Foundry-Master» фирмы «Worldwide Analytical Systems AG (WAS AG)». Сталь 09Г2С имеет ферритно-перлитную структуру со средним размером зерна 18,5 мкм.

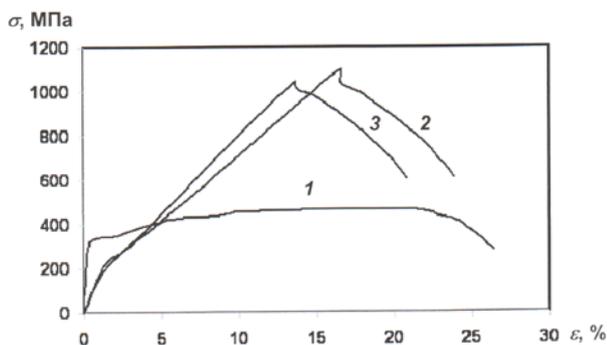
Цилиндрические заготовки из стали подвергали ковке и последующему РКУ-прессованию. В наших экспериментах осуществлялось трехкратное повторение последовательности операций свободной ковки – осадки и протяжки со сменой оси прилагаемого деформирующего усилия. Предварительно нагретая в муфельной печи Nabertherm заготовка Ø20×60 мм подвергалась всесторонней свободной ковке с помощью пневматического молота. Температуру заготовки при ковке контролировали с помощью инфракрасного термометра модели DT-8859, у которого диапазон измеряемой температуры 223-1873 К, разрешение 0,1 градуса, спектральная чувствительность 8~14 мкм. РКУП заготовок выполняли в технологической оснастке с углом пересечения каналов 120° на базе гидравлического пресса «ПСУ 125» типа ЗИМ с максимальным усилием 1250 кН. Режимы обработки стали 09Г2С следующие:

1) ковка в три цикла с нагревом в течение 1 часа с варьированием температуры начала ковки (1173/1023 К и 1273/1023 К) и скоростью охлаждения заготовки (охлаждение в масле или выдержка в теплой золе с остыванием на воздухе);

2) РКУП по маршруту В<sub>с</sub> (поворот заготовки относительно её продольной оси перед

каждым последующим циклом прессования на угол  $90^\circ$ ) в 4 прохода при температуре 673 К с остыванием заготовки на воздухе или в воде после прессования. Накопленная при ковке деформация при коэффициенте трения  $\mu > 0$  составила 2,25. Степень деформации заготовки при РКУП за 4 прохода составила  $\epsilon_4 = 2,67$ .

Механические свойства исследовали при растяжении образцов на испытательной машине Instron-1195 при постоянной скорости нагружения, равной  $\approx 3,33 \cdot 10^{-5} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ .



**Рис. 1.** Диаграмма деформирования растяжением стали 09Г2С в различных состояниях: 1 – состояние поставки; 2 – ковка в 3 цикла при 1173/1023 К с охлаждением в масле + РКУП по маршруту В<sub>С</sub> в n=4 прохода при 673 К с остыванием на воздухе; 3 – при тех же режимахковки и РКУП, но при температурековки 1273/1023 К

**Результаты исследований и их обсуждение.** Кривая растяжения образцов из стали 09Г2С в состоянии поставки имеет классический вид графика с площадкой текучести (рис. 1). Для упрочненной стали значительная доля удлинения образца приходится на упругую стадию. Упрочнение стали ковкой и РКУП приводит к образованию высокого зуба текучести (кривые 2 и 3 на рис. 1). Как известно, возможность возникновения резкой текучести материала с малой исходной плотностью подвижных дислокаций в начале пластического течения описывается теорией Гана. Более высокий зуб текучести в случае режима 3 (см. таблицу 1) соответствует большей плотности дислокаций в образце.

Послековки и РКУП стали 09Г2С происходит заметное уменьшение размеров зерен, возрастает плотность дислокаций, что влияет на повышение прочностных показателей. В результатековки и РКУП прочность стали 09Г2С повышается (таблица 1). Наряду с повышением предела прочности происходит повышение предела текучести, который после комбинированной обработки становится сравнимым с пределом прочности.

**Таблица 1.** Механические характеристики стали 09Г2С в различных состояниях

Состояние материала	$\sigma_{1,2}$ , МПа	$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta$ , %
1. исходное (состояние поставки)	337	462	24,4
2. ковка в 3 цикла, 1173/1023 К, охлаждение в масле	393	484	23,2
3. ковка в 3 цикла, 1173/1023 К, масло + РКУП (В <sub>С</sub> , n=4, 673 К), остывание на воздухе		1097	10,22
4. ковка в 3 цикла, 1173/1023 К, масло + РКУП (В <sub>С</sub> , n=4, 673 К), остывание в воде		1013	9,67
5. ковка в 3 цикла, 1173/1023 К, выдержка в тепловой золе, затем остывание на воздухе + РКУП (В <sub>С</sub> , n=4, 673 К), остывание на воздухе		931	9,89
6. ковка в 3 цикла, 1173/1023 К, выдержка в тепловой золе, остывание на воздухе + РКУП (В <sub>С</sub> , n=4, 673 К), остывание в воде		942	9,34
7. ковка в 3 цикла, 1273/1023 К, масло + РКУП (В <sub>С</sub> , n=4, 673 К), остывание на воздухе		1030	9,29
8. ковка в 3 цикла, 1273/1023 К, масло + РКУП (В <sub>С</sub> , n=4, 673 К), остывание в воде		994	7,99

Как видно из таблицы, ковка в 3 цикла с охлаждением в масле приводит к некоторому повышению прочности и снижению пластичности. Ковка при тех же режимах, но дополнительным упрочнением РКУП в 4 прохода по

маршруту В<sub>С</sub> при температуре 673 К обеспечивает существенное повышение прочностных характеристик стали 09Г2С (в 3 раза по пределу текучести и в 2,4 раза по пределу прочности по сравнению с состоянием поставки материала).

ла), 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. пп. 3 и 5). Повышение температуры началаковки на 100 градусов при тех же режимах РКУП понижает прочностные характеристики на 20-70 МПа, что составляет около 2-6% от предела прочности в случае температуры началаковки в 1173 К (см. пп. 3 и 7, 4 и 8). Это связано со снижением плотности дислокаций. В обоих случаях пластичность снижается на 9-17%. Более лучшие результаты по характеристикам прочности и пластичности получились по режиму 3 (ковка в 3 цикла, 1173/1023 К, охлаждение в масле + РКУП ( $V_C$ ,  $n = 4$ , 673 К), остывание на воздухе).

**Выводы:** результаты исследований показывают, что варьированием режимовковки и РКУП можно регулировать состояние и механические свойства низколегированной стали 09Г2С. 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  $V_C$  при температуре 673 К с последующим остыванием заготовки на воздухе. Таким образом, определенное сочетание различных методов интенсивной

пластической деформации позволяет существенно повысить прочность сталей.

*Работа выполнена при финансовой поддержке проекта № III.20.3.3 Программы № III.20.3 СО РАН.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Иванова, В.С.* Новые пути повышения прочности металлов / *В.С. Иванова, Л.К. Гордиенко.* – М.: Наука, 1964. 118 с.
2. *Бернштейн, М.Л.* Термомеханическая обработка металлов и сплавов. – Т.1. М.: Металлургия, 1968. 596 с.
3. *Бернштейн, М.Л.* Прочность стали. – М.: Металлургия, 1974. 199 с.
4. *Гуляев, А.П.* Структурные изменения при термомеханической обработке стали и их влияние на механические свойства // *МиТОМ.* 1965. № 11. С. 9-17.
5. *Григорьев, А.К.* Термомеханическое упрочнение стали в заготовительном производстве / *А.К. Григорьев, Г.Е. Коджаспиров.* – М.: Машиностроение, Л.О., 1985. 143 с.
6. *Садовский, В.Д.* Сталь / *В.Д. Садовский, Г.В. Маханёк.* – М.: Наука, 1990. 112 с.
7. *Григорьев, Р.С.* Термопластическое упрочнение как перспективное направление в создании высокопрочных материалов / *Р.С. Григорьев, Т.С. Сосин, В.П. Степанов, П.Г. Яковлев* // Научно-технический прогресс и физико-технические проблемы Севера. Якутск, 1972. С. 68-87.
8. *Сегал, В.М.* Процессы пластического структурообразования металлов / *В.М. Сегал, В.И. Резников, В.И. Копылов* и др. – Минск: Наука і тэхніка. 1994. 231 с.
9. *Валиев, Р.З.* Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства / *Р.З. Валиев, И.В. Александров.* – М.: ТКЦ «Академкнига», 2007. 398 с.

## COMBINATION OF METHODS OF STEEL MECHANICAL PROCESSING

© 2012 A.M. Ivanov

Institute of Physical and Technical Problems of the North named after V.P. Larionov  
SB RAS, Yakutsk

Questions of hardening of steel by combined methods of intensive plastic deformation are considered. Effectiveness of hardening of steel by a combination of forging and equal channel angular pressing is shown.

Key words: *intensive plastic deformation, equal channel angular pressing, forging, strength, steel*