

# МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ ПОСЛЕ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Иванов А. М., Платонов А. А., Петрова Н. Д., Лукин Е. С.

Учреждение РАН «Институт физико-технических проблем Севера СО РАН»  
г. Якутск, Россия,  
[a.m.ivanov@iptpn.ysn.ru](mailto:a.m.ivanov@iptpn.ysn.ru)

## Введение

Упрочнение сталей при термомеханической обработке связано с различными факторами (увеличение плотности дислокаций, дислокационные барьеры, уменьшение размера зерна, размер частиц дисперсной фазы, полиморфное превращение предварительно деформированного металла), влияние которых может быть различным. Эти факторы увеличивают параметры, участвующие в поглощении энергии при механическом нагружении и повышении энергоемкости локальных объемов металла.

В данной работе рассмотрено упрочнение стали закалкой и интенсивной пластической деформацией, проанализирована кривая растяжения и влияние изменения плотности дислокаций на её свойства.

## Материал и методика эксперимента

Исследуемый материал: конструкционная низколегированная сталь 09Г2С в состоянии поставки и после различных видов обработки. Химический состав материала 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. Сталь 09Г2С имеет ферритно-перлитную структуру со средним размером зерна 18,5 мкм в исходном состоянии.

Проводилась закалка стали в воде и масле с различных температур, ковка, кручение, равноканальное угловое прессование (РКУП) объемных заготовок, а также комбинация закалки с механическим воздействием. Нагрев заготовок осуществлялся в кузнечном горне. Кручение заготовок в 2 оборота выполнялось в специальном приспособлении. Всесторонняя ковка проводилась в три цикла. Температура начала деформации кручением цилиндрических заготовок  $\varnothing 20 \times 220$  мм иковки объемных заготовок  $\varnothing 20 \times 60$  мм соответствует 1173 К, а окончания – 1023 К. Послековки и кручения заготовки подвергали закалке в воде от 1203 К. Затем заготовки были подвергнуты РКУП по маршруту «В<sub>С</sub>» в  $n = 4$  прохода при температуре 673 К. Угол пересечения каналов использованной оснастки при РКУП составляет 120°.

Испытания на статическое растяжение пропорциональных плоских образцов типа I проводились на разрывной машине фирмы UTS TestSysteme GmbH (Lammerweg 29.D-89079 Ulm) модели UTS 20k и универсальной испытательной машине «Instron-1195».

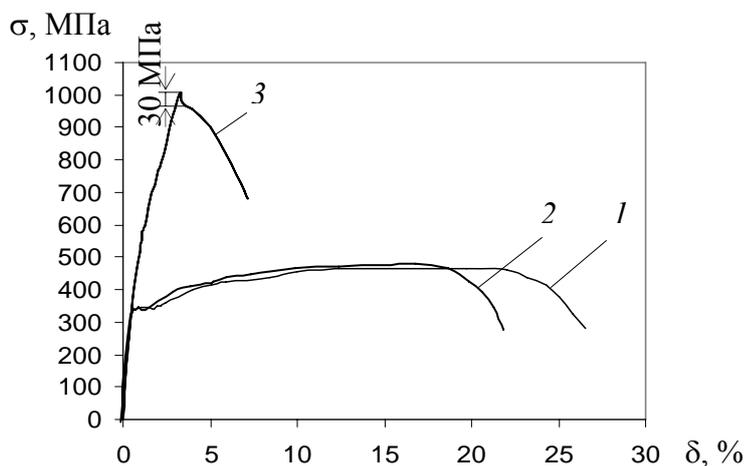
## Результаты исследований

Закалка в масле обеспечивает более высокое значение микротвердости (3,52 ГПа), чем в воде (3,37 ГПа) при одинаковой температуре закалки в 1203 К и одном и том же режиме РКУП (В<sub>С</sub>, 673 К,  $n = 4$ ). В то же время повышение температуры закалки до 1423 К снижает микротвердость материала до 2,11 ГПа. Такая разница в значениях микротвердости объясняется формированием деформированной структуры с повышенным содержанием плотности дислокаций  $2,484 \times 10^{13} \text{ м}^{-2}$  в случае закалки в масле от 1203 К и РКУП (микротвердость 3,52 ГПа) по сравнению с другими режимами ( $1,342 \times 10^{13} \text{ м}^{-2}$  при закалке в воде от 1203 К и РКУП, что соответствует микротвердости 3,37 ГПа и  $1,303 \times 10^{13} \text{ м}^{-2}$  при закалке в масле от 1423 К и РКУП – 2,1 ГПа). В результате металлографических исследований было выявлено, что в исходно ферритно-перлитной стали 09Г2С после закалки в масле от 1423 К образовалась мартенситно-

ферритная микроструктура со средним размером зерна 300 нм. А дальнейшее РКУП закаленной стали приводит к постепенному росту выделения перлита и измельчению феррита. Более высокие показатели прочности ( $\sigma_T = 1164$  МПа,  $\sigma_B = 1231$  МПа) достигнуты при режиме обработки «закалка в воде от 1203 К + РКУП», тогда как при закалке в масле от такой же температуры и РКУП получено  $\sigma_T = 1163$  МПа,  $\sigma_B = 1178$  МПа, а при более высокой температуре закалки 1423 К в масле и вовсе  $\sigma_T = 1108$  МПа и  $\sigma_B = 1140$  МПа.

В результате кручения цилиндрической заготовки в 2 оборота средний размер зерна уменьшился до 12,5 мкм, а микротвердость с 1,62 ГПа увеличился до 1,97 ГПа. В свою очередь комбинированная термомеханическая обработка (кручение при 1173–1023 К в 2 оборота + закалка + РКУП ( $V_C$ , 673 К,  $n = 4$ )) обеспечило измельчение зерна до 4–5 мкм, увеличение микротвердости до 5,88 ГПа. После обработки заготовок по режимам «ковка» и «ковка + закалка + РКУП ( $V_C$ , 673 К,  $n = 4$ )» формируется мелкозернистая структура со средним размером зерна 3–5 мкм, микротвердость повышается до 3,37 и 5,88 ГПа, соответственно. Как видно, хотя при ковке достигается более высокая микротвердость, после последующего РКУП показатели микротвердости практически не отличаются.

Кручение заготовки при данных режимах практически не изменяет прочностные характеристики, но снижает пластичность в 1,2 раза (рис. 1). При этом площадка текучести имеет более прерывистый характер по сравнению с исходным состоянием.



**Рис. 1.** Диаграммы растяжения стали 09Г2С в различных состояниях: 1 – исходное состояние; 2 – после деформации кручения; 3 – после кручения, закалки и РКУП.

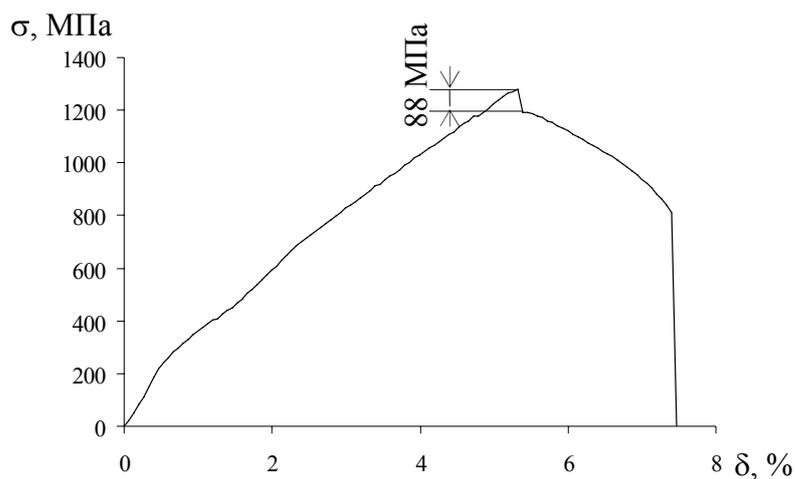
Последующая после кручения закалка и РКУП в 4 прохода повышают прочность 09Г2С в  $\sim 3 \div 2,2$  раза, пластичность уменьшается в 4 раза. При этом предел текучести практически достигает предела прочности, равного 1003 МПа. Также более чем в 5 раз увеличилась область упругих деформаций стали 09Г2С и достигает 3,4 %. Вместе с тем существенно уменьшилась доля пластической де-

формации. Как видно, кривая растяжения имеет высокий зуб текучести материала.

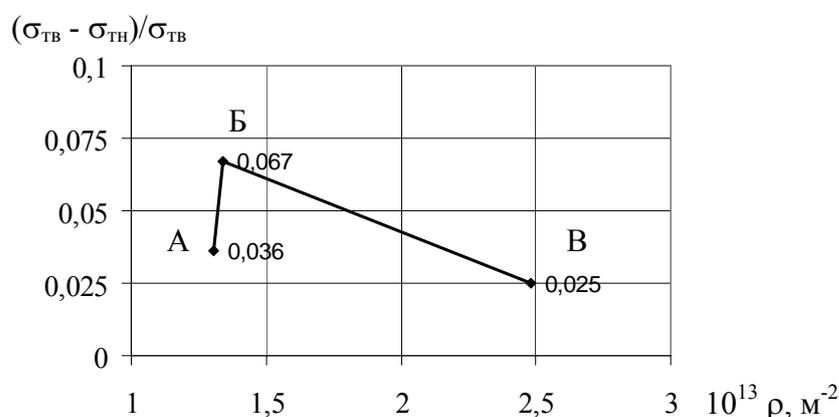
Что касается режимов, связанных со всесторонней ковкой, то высокий зуб текучести наблюдается при растяжении образцов послековки, а такжековки, закалки и РКУП.

Высокий зуб текучести наблюдается и на кривых растяжения образцов из стали 09Г2С, соответствующих режимам «закалка в воде + РКУП» (рис. 2) и «закалка в масле + РКУП»).

Образование зуба текучести по теории Коттрелла связано с резким увеличением числа подвижных дислокаций в начале пластического течения. При этом в исходном образце число подвижных дислокаций должно быть малым и оно должно иметь возможность быстро увеличиться по тому или иному механизму в самом начале пластической деформации. Недостаток подвижных дислокаций в образце может быть связан с закреплением большинства имеющихся дислокаций. Высота зуба текучести зависит от числа подвижных дислокаций. Резкое увеличение числа подвижных дислокаций может быть вызвано разными причинами [1].



**Рис. 2.** Диаграмма растяжения образца из 09Г2С (закалка от 1203 К в воде + РКУП ( $V_C$ , 623 К,  $n = 4$ ) при 293 К.



**Рис. 3.** Зависимость высоты зуба текучести от плотности дислокаций (А – закалка в масле от 1423 К + РКУП ( $V_C$ , 623 К,  $n = 4$ ); Б – закалка в воде от 1203 К + РКУП ( $V_C$ , 623 К,  $n = 4$ ) и В – закалка в масле от 1203 К + РКУП ( $V_C$ , 623 К,  $n = 4$ )).

димому детальное изучение, в частности, влияния границ зерен и распространения полос Чернова-Людерса.

*Работа выполнена при финансовой поддержке проекта №3.6.3.4. Программы №3.6.3 СО РАН и проекта №11.3. Программы фундаментальных исследований Президиума РАН №11.*

### Список литературы

1. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов: Учебник для вузов. М.: Металлургия, 1983. 352 с.

Увеличение прочности, связанное с измельчением зерна, осуществляется за счет увеличения доли межзеренных границ, являющихся препятствием на пути движения дислокаций, а также уменьшения средней длины свободного скольжения дислокаций внутри зерна, и увеличения числа дислокаций, заблокированных границей.

На рис. 3 представлена зависимость высоты зуба текучести от плотности дислокаций в образцах в различных состояниях, представленная в координатах « $((\sigma_{ТВ} - \sigma_{ТН})/\sigma_{ТВ}) - \rho$ ». С увеличением плотности дислокаций в исходном образце высота зуба текучести при растяжении увеличивается, затем в определенном диапазоне исходной плотности дислокаций происходит её уменьшение.

Для более полного объяснения необходимо