

Влияние равноканального углового прессования и закалки на ударную вязкость и характер разрушения образцов стали 09Г2С

М.З. Борисова

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

Рассмотрены особенности разрушения образцов конструкционной стали 09Г2С, полученных путем равноканального углового прессования (РКУП) с последующей закалкой, при разных температурах ударных испытаний. Проведенная термомеханическая обработка привела к значительному росту прочности в сочетании с высоким сопротивлением ударному разрушению, в том числе и при низких температурах испытаний. Установлено, что резкое снижение ударной вязкости сразу после РКУП обусловлено сменой основного механизма разрушения с вязкого ямочного в крупнозернистом состоянии на хрупкое разрушение квазисколом в ультрамелкозернистом состоянии. Последующая термообработка материала оказала заметное релаксирующее воздействие на структуру стали, подвергнутой интенсивной пластической деформации методом РКУП, что позволило сохранить высокую прочность материала с одновременным повышением значений ударной вязкости. Показано, что закалка и кратковременный отпуск после РКУП повысили энергию разрушения более чем в 12 раз при комнатной температуре и почти в 20 раз при -60°C .

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация, равноканальное угловое прессование, низколегированная сталь, ударная вязкость, механизм разрушения.

Influence of Equal Channel Angular Pressing and Quenching on Impact Strength and Fractures of Steel 09G2S

M.Z. Borisova

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

We have considered the fracture features of steel 09G2S obtained by equal channel angular pressing (ECAP) with subsequent tempering and tested at different temperatures of impact test. It is shown that the thermomechanical treatment led to a significant increase in strength coupled with high resistance to impact fracture, including low temperature tests. Found that immediately after ECAP there is a sharp decrease in toughness, which is due to a change of the main destruction mechanism from viscous patching in a coarse-grained condition to brittle fracture by quasi-spalling in ultrafine-grained state. Subsequent thermal treatment of the material had an obvious relaxing effect on the structure of the steel subjected to severe plastic deformation by the ECAP method, allowing it to maintain high strength of the material with simultaneous increase of impact values. It is established that quenching and subsequent short time heating after ECAP increased the energy of destruction more than 12 times at room temperature and almost 20 times at -60°C .

Key words: severe plastic deformation, equal channel angular pressing, low-alloy steel, impact strength, fracture mechanism.

Введение

Металлы и сплавы с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой обладают высоким комплексом физико-механических свойств, например, могут сочетать высокую прочность с достаточной пластичностью, кроме того, возможно и одновременное улучшение эксплуатационных свойств, т.е. целена-

правленно управляя структурными и фазовыми превращениями, можно добиться оптимального сочетания механических и служебных свойств данного материала. Эффективным путем получения УМЗ материалов является использование методов интенсивной пластической деформации (ИПД), в основе

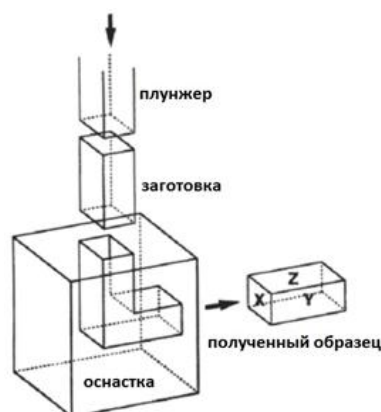


Рис. 1. Схема процесса РКУП: X – поперечная, Z и Y – продольные плоскости образца [2]

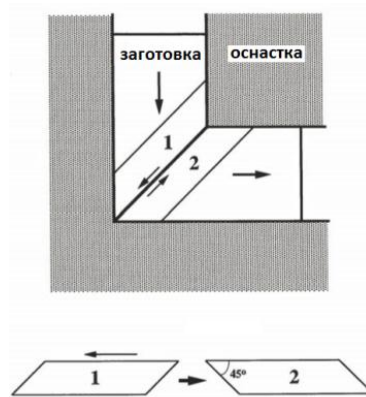


Рис. 2. Принцип процесса РКУП: 1–2 – плоскость сдвига, где элемент 1 транспонируется в элемент 2 [2]

которых лежит сочетание больших степеней деформации сдвига при температурах ниже температурного порога рекристаллизации материала и высоких давлений. Одним из наиболее распространенных методов ИПД является равноканальное угловое прессование (РКУП) [1–3]. В методе РКУП для получения УМЗ структуры в материале применяются металлические прутки диаметром от 10 до 60 мм [1]. Обрабатываемый материал продавливается через специальную оснастку с двумя пересекающимися каналами (рис. 1), в месте пересечения которых материал подвергается воздействию значительного квазигидростатического давления, которое обеспечивает однородную деформацию простого сдвига (рис. 2).

Высокие степени деформации, привнесенные в материал в ходе РКУП, ведут к формированию сильно фрагментированной и кристаллически разориентированной микроструктуры. Таким образом, происходит значительное измельчение структуры, вплоть до наноразмерного уровня. Изменяя уровень деформации, варьируя число циклов прохода заготовки через каналы, скорость и температуру деформации, можно управлять зёрненной и дислокационной структурой материала. Различают следующие маршруты РКУП (рис. 3):

маршрут А – ориентация заготовки остается неизменной при каждом проходе;

маршрут В – после каждого прохода заготовка поворачивается вокруг своей продольной оси на угол 90° (B_A – со знакопеременным вращением образца и B_C – без изменения направления вращения);

маршрут С – после каждого прохода заготовка поворачивается вокруг своей продольной оси на угол 180° .

Большинство работ по исследованию методов

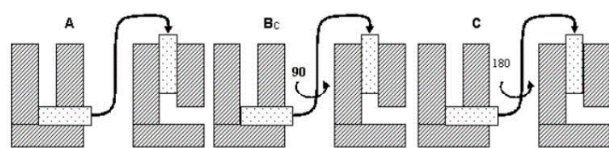


Рис. 3. Схема маршрутов РКУП [4]

ИПД сфокусировано на чистых металлах, что позволяет проследить изменения структурного состояния материала в отсутствии других фаз. Сталям же уделяется гораздо меньше внимания, несмотря на то, что это один из важнейших и наиболее распространенных в мире конструкционных материалов. Например, низколегированные стали могут обеспечить широкий диапазон механических и физических свойств и привлекают интерес исследователей к изучению физической природы повышения прочности, а также и механизмов их разрушения на различных масштабных уровнях [5–9].

Материалы и методы исследования

Исследования были проведены на образцах стали 09Г2С со следующим химическим составом: С – 0,09; Si – 0,64; Mn – 1,26; P – 0,007; S < 0,003; Cr – 0,08; Ni – 0,1; Al – 0,02; Cu – 0,14; V < 0,002; Nb – 0,01; Ti – 0,013 %. РКУП проводили при температуре прессования 500°C , число циклов 4. Заготовки стали 09Г2С диаметром 20 мм и длиной 120 мм подвергали РКУП с углом пересечения каналов $\Phi=90^\circ$ по маршруту А. После РКУП была проведена закалка (8 мин при 910°C с охлаждением в масло) с последующим кратковременным отпуском (в течение 15 мин при 680°C).

Прочностные характеристики измерялись с помощью универсальной испытательной машины «ZWICK Z600» при комнатной температуре при скорости деформирования 2 мм/мин и величине предельной нагрузки 2 т. Ударная вязкость измерялась на образцах Шарпи при температурах испытания 20, -20 и -60°C на маятниковом копре «Roell Amsler RKP-450» с энергией удара 300 Дж. Исследования микрорельефа поверхностей излома были проведены с использованием растрового электронного микроскопа JEOL JSM-7800F с интегрированным энергодисперсионным элементным анализатором EDX Oxford Instruments.

Результаты и обсуждение

Испытания на растяжение образцов стали 09Г2С после 4 циклов РКУП при 500°C показали рост предела прочности с 690 МПа в исходном

крупнозернистом состоянии до 1150 МПа в УМЗ состоянии, таким образом прочность возросла в 1,7 раз. Но также при этом наблюдается значительное снижение пластичности, что может негативно отразиться на способности материала сопротивляться разрушению под действием ударной нагрузки.

Измерения величины ударной вязкости образцов Шарпи с применением метода испытания на ударный изгиб при разных температурах испытания показали, что равноканальное угловое прессование привело к резкому снижению значений ударной вязкости УМЗ материала по сравнению с исходным крупнозернистым состоянием, почти в 10 раз при комнатной температуре и более чем в 12 раз при -60°C (рис. 4). При последующей после РКУП термообработки произошел значительный рост способности материала сопротивляться разрушению во всем диапазоне температур испытаний. Закалка и кратковременный отпуск привели к релаксации внутренних напряжений и к формированию структуры с более высокой энергией разрушения, чем сразу после РКУП, более чем в 12 раз при комнатной температуре и почти в 20 раз при -60°C (рис. 4).

Для выявления механизмов разрушения материала при испытаниях на ударный изгиб был проведен фрактографический анализ изломов образцов. Исследования микрорельефа поверхностей излома показали, что в исходном крупнозернистом состоянии для поверхности излома после ударных испытаний при комнатной температуре характерен вязкий ямочный рельеф, который сохраняется и при -20°C (рис. 5, а–б). На поверхности образца, разрушенного при комнатной температуре, в центральной части излома видны вязкие гребни, на вершинах которых имеются множественные неглубокие ямки, во впадинах – ямки глубокие равноосные (рис. 5, а). При снижении температуры испытаний до -60°C доминирующим микромеханизмом ударного разрушения становится микроскол (рис. 5, в).

Резкое снижение ударной вязкости материала после РКУП обусловлено появлением деформационной текстуры, образовавшейся в ходе интенсивной пластической деформации, и сменой основного механизма разрушения. Разрушение низколегированной стали 09Г2С после 4 циклов РКУП происходит по механизму квазискола с образованием гребней и ступенек (рис. 6).

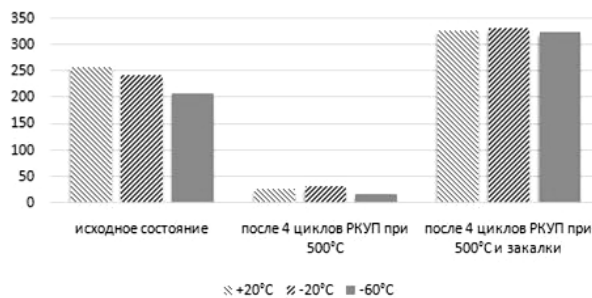


Рис. 4. Значения ударной вязкости стали 09Г2С в исходном состоянии, после РКУП и РКУП+закалка при различных температурах ударных испытаний (Дж/см²)

Такой микрорельеф характерен для разрушения полосчатой структуры. Закалка и последующий кратковременный отпуск привели к формированию практически свободных от дислокаций ячеистых структур и смене основного механизма ударного разрушения: с квазискола на вязкий ямочный во всем диапазоне температур испытаний (рис. 7). При испытаниях при комнатной температуре в очаге разрушения наблюдается вязкая зона сдвига с сильно вытянутыми ямками (рис. 7, а). При отрицательных температурах ударных испытаний излом состоит из глубоких равноосных различного размера ямок, чередующихся с порами, в центре

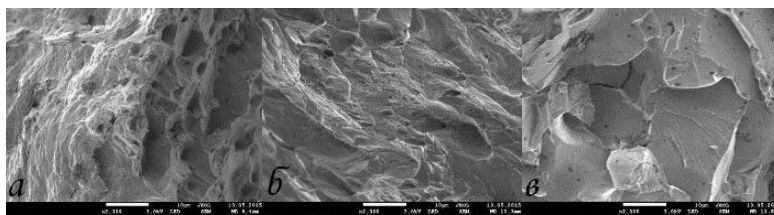


Рис. 5. Поверхности разрушения стали 09Г2С в исходном состоянии, при температуре испытаний 20°C (а), -20°C (б) и -60°C (в), увеличение $\times 2000$

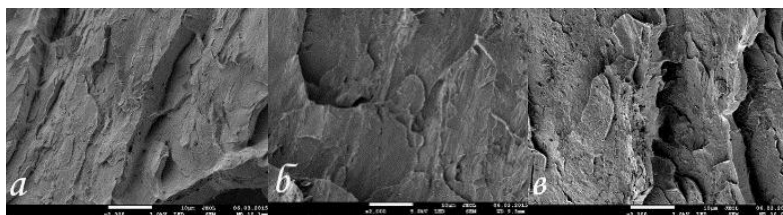


Рис. 6. Поверхности разрушения стали 09Г2С после 4 циклов РКУП при 500°C , при температуре испытаний 20°C (а), -20°C (б) и -60°C (в), увеличение $\times 2000$

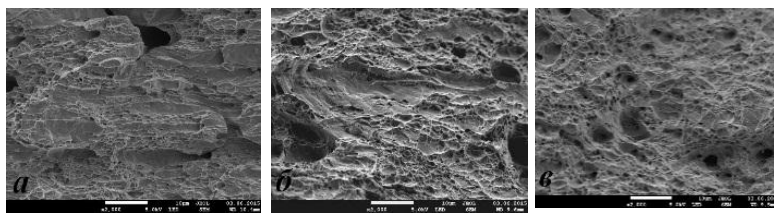


Рис. 7. Поверхности разрушения стали 09Г2С после 4 циклов РКУП при 500°C и закалки, при температуре испытаний 20°C (а), -20°C (б) и -60°C (в), увеличение $\times 2000$

некоторых из них видны круглые включения, являющиеся центрами зарождения пор (рис. 7,б–в). Путем энергодисперсионного элементного анализа выявлено, что сферические включения являются избыточной карбидной фазой Fe_3C .

Заключение

Полученные в данной работе результаты показывают возможность улучшения конструкционных свойств низколегированной стали путем комбинирования равноканального углового прессования и закалки. Показано, что РКУП, формируя УМЗ структуру, повышает прочность стали 09Г2С в 1,7 раз по сравнению с исходным состоянием, однако снижает пластические свойства и ударную вязкость. Установлено, что РКУП привело к смене основного механизма разрушения с вязкого ямочного в крупнозернистом состоянии на хрупкое разрушение квазисколом в УМЗ состоянии, а значит, несмотря на высокие прочностные характеристики материала после РКУП необходима последующая термообработка, позволяющая сохранить высокую прочность материала с одновременным повышением значений ударной вязкости. Показано, что закалка и кратковременный отпуск оказали заметное релаксирующее воздействие на структуру стали, подвергнутой интенсивной пластической деформации методом РКУП, и повысили энергию разрушения более чем в 12 раз при комнатной температуре и почти в 20 раз при -60°C . Результаты проведенной работы могут быть использованы при разработке технологий упрочнения и повышения хладостойкости конструкционных сталей.

Литература

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение,

структура и свойства. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.

2. Valiev R.Z., Langdon T.G. Developments in the use of ECAP processing for grain refinement // *Reviews on Advanced Materials Science*. – 2013. – № 1. – P. 15–26.

3. Cojocaru V. D., Răducanu D., Șerban N. et al. Microstructural observations of fracture surfaces for a 6063-t1 ECAP processed aluminum alloy // *Sci. Bull.* – 2010. – Series B. – Vol. 72, Iss. 3. – P. 163–172.

4. Сегал В.М., Резников В.И., Дробышевский А.Е., Копылов В.И. Пластическая обработка металлов простым сдвигом // *Известия АН СССР. Металлы*. – 1981. – № 1. – С. 115–120.

5. Borisova M., Yakovleva S., Makharova S. Investigation of steel 09G2S processed by equal channel angular pressing // *Adv. Mat. Research*. – 2015. – Vol. 1127. – P. 61–65.

6. Захарова Г.Г., Астафурова Е.Г., Найденкин Е.В. и др. Механические свойства и характер разрушения феррито-перлитной стали 10Г2ФТ, подвергнутой равноканальному угловому прессованию и высокотемпературным отжигам // *Материаловедение*. – 2010. – № 11. – С. 57–64.

7. Клевцов Г.В., Валиев Р.З., Клевцова Н.А. Прочность и механизмы ударного разрушения наноструктурированных материалов // *Фундаментальные исследования*. – 2011. – № 11. – С. 345–350.

8. Greger M., Vodarek V., Dobrzanski L.A. et al. The structure of austenitic steel AISI 316 after ECAP and low-cycle fatigue // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. – 2008. – Vol. 28, Iss. 2. – P. 151–158.

9. Lehrbacher C., Zinner S., Leitner H. Atome probe study of the carbon distribution in a hardened martensitic hot-work tool steel X38CrMoV5-1 // *Micron*. – 2012. – 43. – P. 818–826.

Поступила в редакцию 10.09.2015

УДК 622.691.4.004.14 (211), 620.171.2:620.186.4

Разрушения и повреждения объектов магистрального газопровода при длительной эксплуатации в условиях Арктики

А.М. Большаков, А.С. Сыромятникова

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

Приведены результаты исследования влияния длительной эксплуатации на структуру и механические свойств малоуглеродистой низколегированной стали трубы магистрального газопровода Республики Саха (Якутия). Показано, что протекающие на нанометровом масштабном уровне структурно-

БОЛЬШАКОВ Александр Михайлович – д.т.н., зав. отделом, a.m.bolshakov@iptpn.ysn.ru; СЫРОМЯТНИКОВА Айталипа Степановна – к.ф.-м.н., в.н.с., a.s.syromyatnikova@mail.ru.