

2. Львов О.В., Касацкий Н.Г., Радишевская Н.И. Влияние механической активации на фазовый состав и структуру шпинельсодержащих СВС-пигментов // Вестник Томского государственного университета. Химия. – 2015. - № 1. – С. 26-32.
3. Григорьева Т.Ф., Барина А.П., Ляхов Н.З. Механохимический синтез в металлических системах. - Новосибирск: Параллель. – 2008. – 311 с.
4. Корчагин М.А., Аввакумов Е.Г. и др. Тепловой взрыв и самораспространяющийся высокотемпературный синтез в механически активированных смесях SiO₂-Al // Физика горения и взрыва. – 2014. - № 6. – С. 21-27.
5. Yatsimirskiy V.K., Tyrenkova N.I. The interaction of molecular nitrides with iron clusters // Theoretical and experimental chemistry. – 1975. - № 11. - pp 378-381.

МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТРУБНОЙ СТАЛИ 09Г2С ПРИ РАДИАЛЬНОМ СДВИГОВОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ ПОПЕРЕЧНО ВИНТОВОЙ ПРОКАТКОЙ

*Р.В. СТАНКЕВИЧ², Н.С. СУРИКОВА², И.В. ВЛАСОВ¹, И.П. МИШИН²,
С.В. ПАНИН^{1,2}, А.С. СМЕРНОВА¹, А.В. ЯКОВЛЕВ²*

¹Томский политехнический университет

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

E-mail: good0@yandex.ru

Высокие прочностные характеристики конструкционных сталей традиционно достигаются путём введения различных легирующих элементов, проведения сложных многоступенчатых термомеханической обработок и т. д. С другой стороны, малоуглеродистые низколегированные стали характеризуются невысокими прочностными свойствами, сочетающими высокую пластичность/вязкость и хорошую свариваемость. Однако, применение к ним обработок, совмещающих достижение высоких степеней деформации и контролируемого термического воздействия с последующим охлаждением, могут приводить к существенному повышению, как предела текучести, так и предела прочности [1, 2]. Таким образом, возможно изготовление высокопрочных и ответственных деталей без использования дорогостоящего легирования. Недостатком таких обработок является создания сильно деформированного состояния, зачастую сопровождающегося охрупчиванием материала.

Для решения проблемы повышения прочности и снижения хрупкости низколегированных сталей используют контролируемую прокатку, обеспечивающую градиентную модификацию структуры в объеме материала [3]. Тем самым достигается формирование материала с повышенной прочностью в поверхностном слое и сохранением вязкости/пластичности в сердцевине. Одним из таких методов, активно разрабатываемых в ИФПМ СО РАН для трубных сталей, является «теплая» поперечно-винтовая прокатка. Предварительно подобранные температурные режимы прокатки [4] и количество проходов позволяют формировать в объёме материала многоуровневую структуру с высокими диссипативными свойствами, эффективно подавляющие локализацию пластического течения и значительно сдерживающие зарождения и распространения трещин.

В качестве объекта исследования была выбрана конструкционная низколегированная сталь 09Г2С, широко применяемая как в строительстве трубопроводных систем, так и для элементов несущих конструкций различного назначения. Прокатку прутков проводили на трёхвалковом стане. Было выполнено 5 проходов от температуры 850 С с закалкой в воду после каждого прохода ($E_{\text{сумм}}=73,77\%$). Целью данного исследования является изучение влияния поперечно-винтовой (ПВ) прокатки на структуру и механические свойства стали 09Г2С.

В состоянии поставки сталь 09Г2С имеет феррито-перлитную структуру с характерным размером зерна 21 ± 2 мкм. После ПВ-прокатки в продольном и поперечном направлении в поверхностном слое глубиной 1 мм формируется мелкодисперсная структура, состоящая из феррита и разрушенных пластин перлитной фазы. Проведены исследования структуры стали в состоянии поставки и после прокатки с помощью просвечивающего электронного микроскопа (рис. 1,а,б). В перлитном зерне материала без прокатки видны характерные пластины цементита толщиной 100-150 нм (рис. 1,а). В ферритной фазе встречаются карбидные включения размером 250-400 нм. После прокатки происходит измельчение ферритного зерна и разрушение цементитных пластин (рис. 1,б). Средний размер субзерна после прокатки составляет порядка 300 нм, а в поверхностном слое может достигать 100 нм.

Проведено измерение микротвёрдости в поперечном сечении прутка после ПВ-прокатки от поверхности к центру (рисунок 1,в). Наибольшее увеличение микротвёрдости наблюдается в поверхностном слое глубиной до 3 мм, а упрочнение происходит по всему объёму прутка. Образцы для испытаний на статическое растяжение вырезали из прутка после ПВ-прокатки на глубине от 3 мм, где перепад значений микротвёрдости был не таким большим, как в поверхностном слое. Это приводило к умеренному разбросу характеристик прочности при растяжении (таблица 1). По результатам испытаний на статическое растяжение видно, что после ПВ-прокатки, сохраняется как зуб, так и площадка текучести (рисунок 1,г). Напряжение на площадке текучести и предел пропорциональности повышаются на 26%, а зуб текучести по уровню напряжений сопоставим с пределом прочности. Протяженность площадки текучести увеличивается в 3 раза.

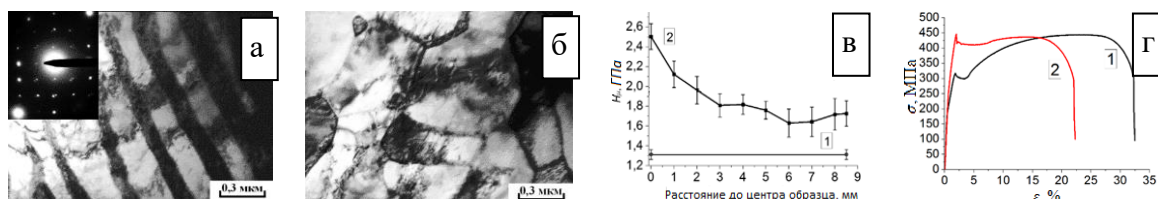


Рисунок 1 – а) структура стали 09Г2С в исходном состоянии, б) после ПВ-прокатки; в) график микротвёрдости прутка после проката от края к центру; г) диаграмма растяжения; 1-в состоянии поставки; 2 - после проката

Таблица 1 - Результаты статического растяжения

Состояние	$\sigma_{пц}$	$\sigma_{пл.текучести}$	$\epsilon_{пл.текучести}, \%$	$\sigma_{зуб текучести}$	$\sigma, \text{МПа}$	$\epsilon, \%$
Исходное	163 ± 10	297 ± 10	$1,9 \pm 0,1$	307 ± 20	443 ± 20	32 ± 3
Прокат	219 ± 10	403 ± 20	$6 \pm 0,5$	431 ± 20	438 ± 20	$21 \pm 3 (\downarrow 34\%)$

Таким образом, в результате ПВ-прокатки стали 09Г2С происходит градиентное измельчение структуры, от мелкодисперстного состояния в поверхностном слое до формирования текстуры и измельчения зёрен в сердцевине. Подобные изменения приводят к повышению микротвёрдости с аналогичным градиентным распределением. В образце после ПВ-прокатки сохраняется стадия «параболического упрочнения», значение предела прочности не изменилось, а снижение величины прикладываемой нагрузки при статическом растяжении происходит плавно, аналогично необработанному материалу.

Благодарности: Работа выполнена в рамках плана фундаментальных научных исследований государственных академий наук 2013-2020 гг. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-38-00679 и 18-08-00516, а также грантов президента НШ-5875.2018.8 и СП-2456.2019.1.

Список литературы

1. Cao. R., Ding. Y., Zhao X., et. al. Effect of rolling reductions on microstructure and properties of 2Cr13/316L multi-layered steel composite plate by accumulative roll-bonding // Journal of Materials Research. - 2018. - Vol. 33. - Issue. 24. -P. 4317-4328.
2. Samant S.S., Singh I.V., Singh R.N. Influence of intermediate rolling on mechanical behavior of modified 9Cr-1Mo steel // Materials Science and Engineering a Structural Materials Properties Microstructure and Processing. - 2018. Vol. 738. - P. 135-152.
3. Деревягина Л.С., Гордиенко А.И. Улучшение механических свойств и характеристик низкотемпературного разрушения трубной стали // Сборник трудов конференции Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций. - 2018. - С. 340-341
4. Пищулова А.А., Гордиенко А.И., Деревягина Л.С. Влияние температурных режимов поперечно-винтовой прокатки на особенности формирования структуры и механические свойства низкоуглеродистой трубной стали // Сборник трудов конференции Перспективные материалы конструкционного и медицинского назначения. - 2018. - С. 76-77.

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ
ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ И ГЕКСАФЕРРИТОВ**

А.В. СБРОДОВ¹

¹ Томский государственный университет

E-mail: vip.vasya.1996@mail.ru

Современная радиоаппаратура и электроника нашли широкое применение в повседневной жизни человека. Так, достаточно широко используются различные беспроводные приемо-передающие устройства. Это Bluetooth, Wi-Fi роутеры и адаптеры, сотовые телефоны, умная бытовая техника и аппаратура (IoT-устройства), это всевозможные приборы и системы, используемые для геопозиционирования и отслеживания целей, радиолокационные станции, системы контроля и управления роботизированными комплексами. Частотная область работы подобных приборов крайне часто приходится на диапазон СВЧ излучения [1–3]. Но использование данной аппаратуры создает ряд негативных факторов, таких как угроза биологическим объектам, проблемы электромагнитной совместимости и безопасности, а так же «загрязнение» общего электромагнитного фона. Для решения данного вида проблем достаточно обширно используются композиционные материалы, выступающие в качестве поглотителей микроволновой энергии или экранирующих материалов [4, 5]. В качестве наполнителей для радиокомпозиатов в СВЧ диапазоне довольно широко используются гексагональные ферромагнетики различного типа [6, 7]. Поэтому исследование свойств подобных материалов остается актуальной задачей.

В качестве полимерной матрицы для образцов композиционного материала выступала эпоксидная смола ЭД-20 с отвердителем. В качестве активной фазы использовались порошки бариевого феррита: $BaAlFe_{11}O_{19}$ (M-тип), $BaCo_{0,6}Zn_{1,4}Fe_{16}O_{27}$ (W-тип), $BaCo_{0,7}Zn_{1,3}Fe_{16}O_{27}$ (W-тип), $BaCo_{2,4}Ti_{0,4}Fe_{23,2}O_{41}$ (Z-тип). Ферриты были получены с помощью СВС технологии с последующим обжигом при 1200 °С и обработкой в планетарной мельнице. После измельчения размер частиц составлял менее 100 мкм.

Изготовление образцов композитов производилось по традиционной технологии смешивания исходных компонент. После выбора наполнителя производилось взвешивание составляющих композита. Далее следовало перемешивание смеси до однородного состояния с одновременной обработкой ультразвуком мощностью 20 Вт в течении 1