

УДК: 673.15 + 620.172.2

DOI: 10.17073/0021-3438-2015-1-63-67

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ И ТЕРМООБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ ЛИСТОВ ИЗ ХРОМОЦИРКОНИЕВОЙ БРОНЗЫ BrX1Цр

© 2015 г. Я.А. Ерисов, Ф.В. Гречников, Д.А. Прибытков

Самарский государственный аэрокосмический университет (СГАУ)  
им. акад. С.П. Королева (национальный исследовательский университет)

Самарский научный центр РАН

*Статья поступила в редакцию 03.07.14 г., подписана в печать 25.07.14 г.*

Приведены результаты исследования влияния режимов термомеханической обработки на структуру и анизотропию механических свойств листов из хромоциркониевой бронзы BrX1Цр для последующего изготовления из них токопроводов гибкой. Термомеханическая обработка включала закалку с температуры 980 °С в воду, холодную прокатку с различными степенями обжатия (16 и 46 %) и старение при 475 °С в течение 3 ч. По результатам испытаний на механические свойства определены эмпирические зависимости пределов прочности и текучести, относительного удлинения листов из BrX1Цр от степени обжатия при прокатке. Установлено, что анизотропия свойств проката незначительна и слабо изменяется на различных стадиях обработки. Средний размер зерен в образцах после различной обработки варьируется незначительно и составляет 41,88–47,50 мкм.

**Ключевые слова:** холодная прокатка, закалка, старение, хромоциркониевая бронза, BrX1Цр, механические свойства, анизотропия, микроструктура, размер зерна.

The results of the investigation into the influence of thermomechanical treatment modes on the structure and anisotropy of mechanical properties of sheets made of the BrKh1Tsr chromium–zirconium bronze for the subsequent fabrication of current leads from them by bending. Thermomechanical treatment included quenching from 980 °C into water, cold rolling with various degrees of drafting (16 and 46 %), and age hardening at 475 °C for 3 h. Empirical dependences of ultimate strength and yield point as well as relative elongation of the sheets made of the BrKh1Tsr bronze on the degree of drafting during rolling are determined based on the results of tests for mechanical properties. It is established that the anisotropy of the rolled metal properties is insignificant and varies weakly at various treatment stages. The average grain size in the samples after various treatment varies insignificantly and constitutes 41,88–47,50 μm.

**Keywords:** cold rolling, quenching, age hardening, chromium–zirconium bronze, BrKh1Tsr, mechanical properties, anisotropy, microstructure, grain size.

### Введение

В настоящее время сплавы на основе меди (бронзы) относятся к наиболее распространенным конструкционным материалам после стали и алюминиевых сплавов. Наиболее широко бронзы применяются в электромашиностроении, что обусловлено их высокой электро- и теплопроводностью [1, 2].

Среди многочисленных марок бронз особый интерес представляют экономно легированные сплавы с малым (до 1 %) содержанием легирующих элемен-

тов. К таким сплавам относится хромоциркониевая бронза BrX1Цр, которая обладает практически такой же электро- и теплопроводностью, как и чистая медь, но при этом имеет большие значения твердости, предела текучести, износостойкости, предела усталости и сохраняет работоспособность до более высоких температур за счет повышенной (по сравнению с чистой медью) температуры начала рекристаллизации [3].

*Ерисов Я.А. – канд. техн. наук, вед. инженер НИЛ-37 СГАУ (443086, г. Самара, Московское шоссе, 34).  
E-mail: yaroslav.erisov@mail.ru.*

*Гречников Ф.В. – чл.-кор. РАН, докт. техн. наук, проф., 1-й зам. пред-ля Самарского научного центра РАН (443001, г. Самара, Студенческий пер., 3А), зав. кафедрой обработки металлов давлением СГАУ.  
Тел.: (846) 337-53-81. Факс: (846) 337-82-79. E-mail: fgrech@ssc.smr.ru; gretch@ssau.ru.*

*Прибытков Д.А. – студент инж.-технол. фак-та СГАУ. E-mail: demonpugachev6@yandex.ru.*

Уникальное сочетание свойств бронзы БрХ1Цр позволяет использовать ее не только в качестве электродного и коллекторного материала, но и для нагруженных элементов (токопроводящих пружин, сварочных роликов и т.п.), которые изготавливают, в основном, гибкой листовых полуфабрикатов. При этом предельные деформационные возможности материала в данной операции зависят от механических свойств и их анизотропии, которая формируется при его термомеханической обработке [4, 5].

Так, в работах [6, 7] установлен оптимальный для горячей деформации температурный интервал (250–350 °С), при котором сплав БрХ1Цр обладает максимальной пластичностью. Также показано [8, 9], что наибольшее влияние на свойства хромоциркониевой бронзы оказывают степень холодной деформации, температура и время последующего старения, которые определяют механизм дисперсионного твердения, а значит, размеры и форму упрочняющих частиц. Однако авторы [3, 6–9] не уделили должного внимания изучению анизотропии свойств и ее формированию при обработке БрХ1Цр, которая оказывает решающее влияние на технологическую пластичность материала [4].

Поэтому в данной работе была поставлена задача по исследованию влияния степени обжатия при холодной прокатке на структуру и анизотропию механических свойств листов из сплава БрХ1Цр до и после старения.

## Методика исследований

Экспериментальные исследования проводили на листах из сплава БрХ1Цр толщиной 2 мм (размеры в плане 120×450 мм) в состоянии поставки (термообработка на заводе-изготовителе ОАО «Чепец-

кий механический завод», г. Глазов). Химический состав сплава следующий, %: Cu — основа; 0,74–0,76 Cr; 0,12–0,13 Zr; 0,010 Fe; 0,0098–0,011 Si; 0,0037–0,0041 Al; 0,0052 Zn; 0,0032–0,0035 Sn; 0,051–0,054 примеси.

Схема маршрутов термомеханической обработки листов изображена на рис. 1. Листы по маршруту *I* в течение 20 мин выдерживали в печи при температуре 980 °С (температура считалась установленной, когда в течение 30 мин изменение температуры печи не превышало ±5 °С), после чего их резко охлаждали в воде (закалка). Затем производили старение с выдержкой заготовок в печи при  $t = 475$  °С в течение 3 ч.

Листы по маршрутам *II* и *III* между закалкой и старением подвергали холодной прокатке со степенью обжатия  $\epsilon_h = 16$  и 46 % соответственно (ре-

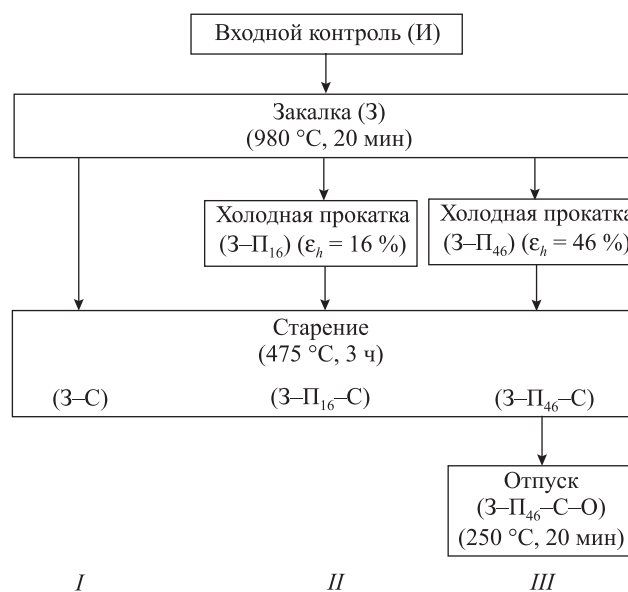


Рис. 1. Маршруты термомеханической обработки листов из БрХ1Цр

Таблица 1

### Режимы экспериментальной прокатки

Номер прохода	Толщина, мм		Относительное обжатие, %		Усилие прокатки, кН
	Начальная	Конечная	За проход	Суммарное	
1	1,96	1,84	6,12	6,12	117,3
2	1,84	1,64	10,87	16,33	227,8
1	2,06	1,88	8,74	8,74	143,7
2	1,88	1,70	9,57	17,48	222,5
3	1,70	1,48	12,94	28,16	295,5
4	1,48	1,28	13,51	37,86	358,7
5	1,28	1,11	13,28	46,12	311,0



Рис. 2. Лабораторный комбинированный стан К 220-75/300 (Д240/300)

Таблица 2

Основные характеристики стана 300

Параметр	Кварто	Дуо
Диаметр опорных валков, мм	220	—
Диаметр рабочих валков, мм	75	240
Длина бочки валков, мм	300	
Скорость прокатки, м/мин	0–20	
Допустимое усилие прокатки, кН	560	720
Минимальная толщина проката, мкм	100	200
Система противоизгиба рабочих валков	+	—
Электромеханическое нажимное устройство		
Измерение усилия прокатки, контактный толщиномер для контроля толщины при рулонной прокатке		
Автоматизированные моталки с системой регулирования положения кромок полосы (противонапряжение 0,6–6,0 кН, максимальный вес рулона 600 кг)		

зультаты экспериментальной прокатки приведены в табл. 1). Кроме того, маршрут III предусматривал низкотемпературный отжиг образцов при  $t = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 20 мин.

Холодную прокатку листов проводили на комбинированном стане немецкой фирмы «DIMA Maschinen GmbH» (рис. 2), который может быть перенастроен в двух (дуо)- или четырех (кварто)-валковый стан (табл. 2). В данной работе прокатку осуществляли на стане в исполнении «дуо». При этом в качестве смазки использовали смазочно-охлаждающую жидкость на базе технологической смазки СТАЛ-3. Перед каждым проходом прокатки смазку вручную наносили на обе стороны карточки путем распыления. Скорость прокатки составляла 2 м/мин.

На каждой стадии термомеханической обработки от листов отбирали образцы для проведения испытаний на растяжение и определение размера зерна. Для изучения механических свойств их вырезали в плоскости листа в 3 направлениях под углами 0, 45 и 90° к направлению прокатки (по 3 образца на каждое направление). Размеры образцов составляли 12,5×120 мм по ГОСТ 11701-84 [10]. Исследования проводили на универсальной испытательной машине «Testometric FS150AX» («Testometric Company Ltd.», Великобритания).

Металлографический анализ выполняли после закалки, холодной прокатки с обжатием 16 и 46 %, а также после старения по маршруту обработки III. Размер зерна определяли по ГОСТ 21073.2-75 методом подсчета зерен в поперечном к направлению прокатки сечении [11]. В качестве травителя использовали хлорное железо.

## Результаты и их обсуждение

На рис. 3 показано влияние степени деформации ( $\epsilon_h$ ) при холодной прокатке на механические свойства (предел прочности  $\sigma_B$ , предел текучести  $\sigma_{0,2}$  и равномерное удлинение  $\delta_p$ ) листов из БрХЦр. Максимальная пластичность наблюдается в закаленных листах, что обусловлено переводом в раствор твер-

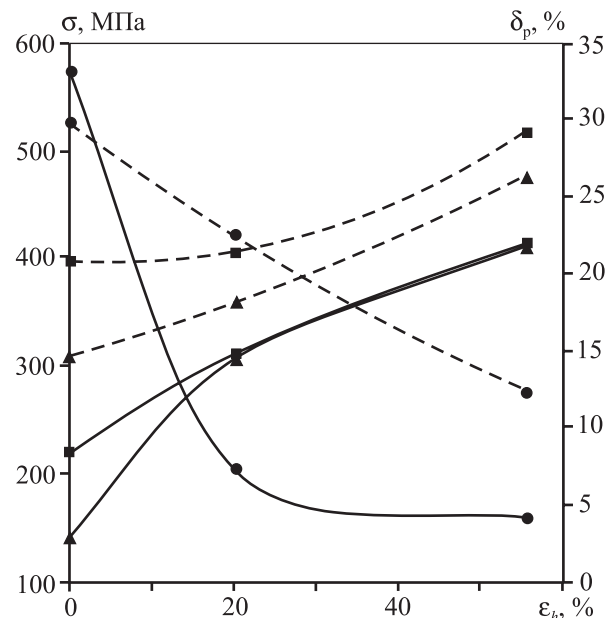
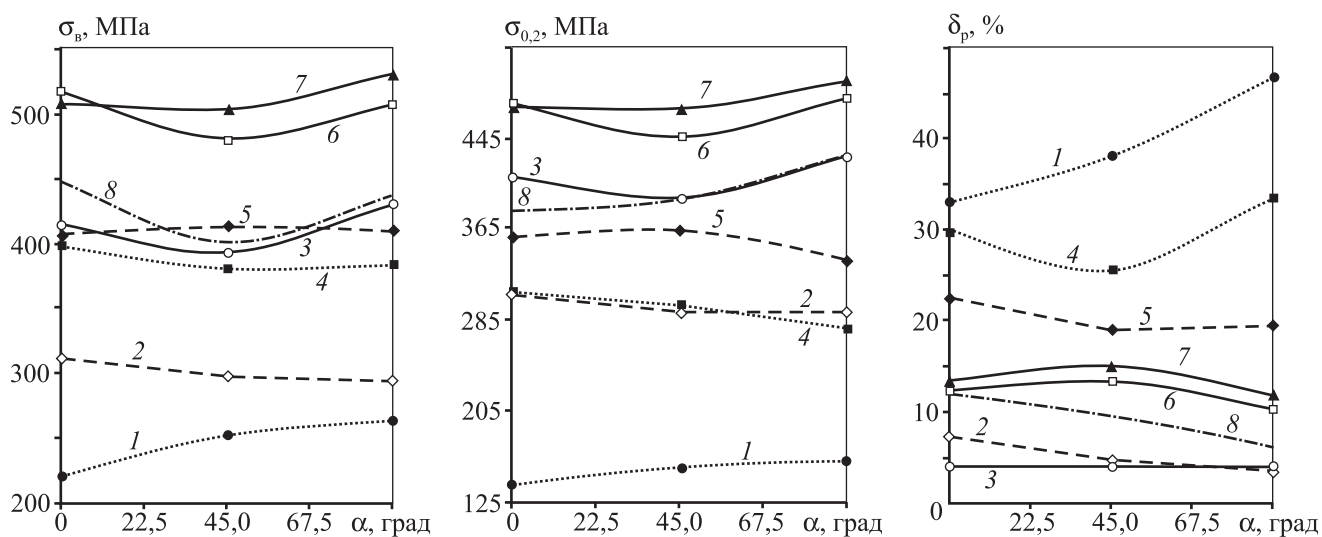


Рис. 3. Зависимость механических свойств от степени деформации при холодной прокатке

■ —  $\sigma_B$ ; ▲ —  $\sigma_{0,2}$ ; ● —  $\delta_p$   
Сплошные кривые — после закалки и прокатки;  
штриховые — после закалки, прокатки и старения



**Рис. 4.** Зависимость механических свойств от направления в плоскости листа  
Режимы – 3 (1), 3–П<sub>16</sub> (2), 3–П<sub>46</sub> (3), 3–С (4), 3–П<sub>16</sub>–С (5), 3–П<sub>46</sub>–С (6), 3–П<sub>46</sub>–С–О (7), И (8)



**Рис. 5.** Микроструктура листов из БрХ1Цр (×360)  
а – закалка  
б, в – холодная прокатка со степенью обжатия 16 % (б) и 46 % (в)  
г – старение

дых и хрупких фаз хрома и циркония. С ростом степени деформации происходят повышение прочностных характеристик и уменьшение пластичности. После старения отмечается увеличение прочности, что связано с выделением вторичных упрочняющих фаз, при этом возрастает и пластичность материала. Дополнительное повышение прочности можно получить холодной деформацией, проведенной между закалкой и старением. Кроме того, как показали исследования, низкотемпературный отжиг, необходимый для снижения остаточных напряжений, не приводит к заметному изменению механических свойств листов из бронзы БрХ1Цр.

Для того чтобы определить, с какой степенью деформации должны быть прокатаны листы из БрХ1Цр для получения заданных свойств, был выполнен регрессионный анализ данных. Кривые, отображающие зависимость механических свойств после старения от степени обжатия (см. рис. 3), были аппроксимированы квадратичной функцией при помощи метода наименьших квадратов [12].

При этом были получены следующие математические зависимости:

— для временного сопротивления, МПа:

$$\sigma_B = 702,07\epsilon_h^2 - 65,067\epsilon_h + 397,91;$$

— предела текучести, МПа:

$$\sigma_{0,2} = 228,56\varepsilon_h^2 - 253,74\varepsilon_h + 310,77;$$

— относительного равномерного удлинения, %:

$$\delta_p = 20,457\varepsilon_h^2 - 47,372\varepsilon_h + 29,903.$$

На основании этих зависимостей могут быть разработаны режимы прокатки, обеспечивающие заданные свойства.

Результаты испытаний на механические свойства в различных направлениях плоскости листа приведены на рис. 4, из которого видно, что анизотропия свойств листов из БрХ1Цр незначительна. Закаленный металл обладает наибольшей анизотропией, которая при холодной прокатке вначале снижается ( $\varepsilon_h = 16\%$ ), а затем меняет свой характер и несколько увеличивается ( $\varepsilon_h = 46\%$ ), но остается меньше по сравнению с состоянием после закалки. Старение и отпуск практически не оказывают влияния на распределение свойств в плоскости листа.

Результаты металлографического анализа микроструктуры закаленных, холоднокатаных и состаренных листов из БрХ1Цр изображены на рис. 5. После закалки структура состоит только из рекристаллизованных зерен. Холодная прокатка со степенью деформации 16% приводит к появлению деформированных зерен, количество которых растет с увеличением степени обжатия, но в целом доля рекристаллизованных зерен преобладает. После старения отчетливо наблюдаются сферические выделения вторичных фаз, равномерно распределенные по всей анализируемой плоскости. Средний размер зерен в образцах после различной обработки изменяется незначительно и составляет 41,88–47,50 мкм.

## Заключение

Для получения максимального уровня механических свойств листов из хромовой бронзы БрХ1Цр

необходима комплексная термомеханическая обработка, состоящая из закалки с температуры 980 °С в воду, холодной прокатки и старения при  $t = 475$  °С в течение 3 ч. При необходимости можно произвести низкотемпературный отжиг при  $t = 200\div 250$  °С для снятия остаточных напряжений. Анизотропия свойств листов из БрХ1Цр незначительна и слабо изменяется на различных стадиях обработки.

## Литература

1. *Смирягин А.П.* Промышленные цветные металлы и сплавы. М.: Металлургиздат, 1956.
2. Справочник по конструкционным материалам / Под ред. Б.Н. Арзамасова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005.
3. *Kuhn H.-A., Tyler D.E., Robinson P.W.* // World of Metallurgy — ERZMETALL. 2007. № 60(2). P. 77.
4. *Гречников Ф.В.* Деформирование анизотропных материалов (Резервы интенсификации). М.: Машиностроение, 1998.
5. *Гречников Ф.В., Ерисов Я.А., Арышенский Е.В.* // Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та им. акад. С.П. Королева (нац. иссл. ун-т). 2011. № 2(26). С. 158.
6. *Ozgowicz W., Kalinowoska-Ozgowicz E., Grzegorzczak B.* // J. Achiev. Mater. Manuf. Eng. 2008. № 29(2). P. 143.
7. *You J.-H., Miskiewicz M.* // J. Nucl. Mater. 2008. № 373. P. 265.
8. *Edwards D.J., Singh B.N., Tahtinen S.* // Ibid. 2007. № 3. P. 904.
9. *Darashevich G., Cvetkovski V., Kostov A.* // МЖОМ. 2002. № 3(8). P. 291.
10. ГОСТ 11701-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент. М.: Изд-во стандартов, 1991.
11. ГОСТ 21073.2-75. Цветные металлы. Определение величины зерна методом подсчета зерен. М.: Изд-во стандартов, 2002.
12. *Кассандрова О.Н., Лебедев В.В.* Обработка результатов наблюдений. М.: Наука, 1970.