

PACS: 81.40.Np

Е.Н. Высоцкий

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЛИТОЙ ОЛОВЯННОЙ БРОНЗЫ

НПП «Станко Маш»  
ул. Р. Люксембург, 72, г. Донецк, 83114, Украина  
E-mail: stankomash2004@ukr.net

Статья поступила в редакцию 22 марта 2007 года

*Наличие неравномерно распределенной хрупкой фазы, эвтектоида, а также примесей, образующих с медью хрупкие выделения, в литой оловянной бронзе БрО12 является причиной ее охрупчивания при обработке давлением. Гидропрессование позволяет деформировать подобные малопластичные материалы. Однако диаметр заготовок не может превышать 40 мм. При прессовании крупногабаритных заготовок использовали наиболее простую схему реализации упрочнения литой оловянной бронзы – механическую осадку, при которой исключается появление трещин и расслоений и повышаются прочностные и пластические характеристики бронзы.*

### Введение

Для упрочнения цветных литых сплавов новизна разрабатываемых технологий и оборудования состоит в использовании комбинированных технологических приемов, включая холодное гидропрессование или другие деформационные процессы в сочетании с термической обработкой [1,2].

Высокими антифрикционными свойствами обладают медные сплавы, в которых основными легирующими компонентами являются олово, алюминий, марганец, кремний, бериллий и др. Это так называемые бронзы, которые в зависимости от состава делятся на оловянные и безоловянные, а в зависимости от назначения и механических свойств – на деформируемые и литейные. Лучшим антифрикционным материалом является литая оловянная бронза БрО12, которая широко применяется как подшипниковый сплав.

К различным деталям машин, в частности блоков цилиндров гидросистем, изготовленным из этой бронзы, предъявляются требования не только хорошей обрабатываемости, достаточной износостойкости и коррозионной стойкости, но и высоких прочности и пластичности.

### Механические свойства оловянной бронзы после деформации осадкой

Высокую износостойкость оловянной бронзы БрО12 обеспечивает наличие в ее структуре твердого эвтектоида, вследствие хрупкости которого этот материал не деформируют прокаткой или ковкой, а используют в литом состоянии. Способность к пластической деформации снижают также такие примеси как S, O<sub>2</sub>, P, Pb и др., образующие с медью хрупкие выделения. Кроме этого, в виде окислов и различных примесей встречаются посторонние включения (рис. 1, а, б): окись олова SnO<sub>2</sub> (твердые включения серого цвета), фосфид меди Cu<sub>3</sub>P (светлые включения неправильной формы, которые отличаются от эвтектоида двухфазным строением).

Изучение микротвердости  $H_{\mu}$  структурных составляющих БрО12 при нагрузке 50 г показало, что  $H_{\mu}$  эвтектоида составляет 2860, Cu<sub>3</sub>P – 2630, светлых дендритов – 2240, темных – 1740 МПа.

Исследование структурного состояния заготовок по диаметру больших (до 145 mm) сечений свидетельствует, что имеются различия в изменении количества и размера эвтектоида не только от центра к краю каждой заготовки, но и для каждой плавки.

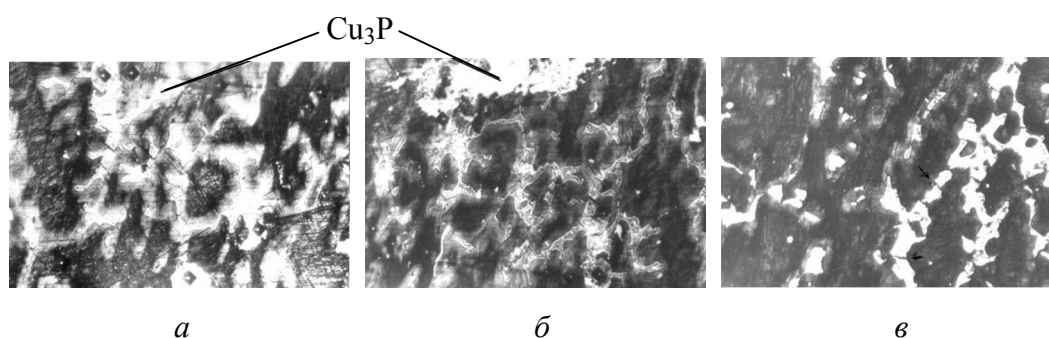
В связи с этим деформирование БрО12 даже при такой благоприятной схеме напряженно-деформированного состояния, как гидропрессование, не позволяет получить качественные крупногабаритные формообразования без появления трещин и расслоений. Наличие неравномерно распределенных скоплений хрупких включений обуславливает неравномерность распределения внутренних напряжений, что разупрочняет материал заготовки. В условиях высокого градиента напряжений на выходе из матрицы в материале заготовки возникают касательные напряжения, превышающие предел прочности, и заготовка разрушается.

Таким образом, если изделие из БрО12 небольшого (до 40 mm) диаметра можно обрабатывать методом гидропрессования, то заготовки крупного сечения этого же материала можно получать (исключая отбраковку по появлению трещин и расслоений), реализуя наиболее простую схему упрочнения – деформацию механической осадкой.

Осадку проводили на экспериментальной оснастке, смонтированной на прессе усилием 1000 tf. Деформацию при осадке оценивали по формуле  $\varepsilon = \frac{H_0 - H}{H_0} \cdot 100\%$ , где  $\varepsilon$  – степень деформации при осадке, %;  $H_0$ ,  $H$  – соответственно начальное и конечное значения высоты деформируемого образца, mm. Усилие прессования при осадке определяли по формуле

$$P = k\sigma_T F, \quad (1)$$

где  $P$  – усилие прессования при осадке, kg;  $k$  – коэффициент, зависящий от формы пуансона, по экспериментальным данным  $k = 1.5-2.7$ ;  $\sigma_T$  – истинное сопротивление деформируемого металла, МПа;  $F$  – площадь проекции осаживаемой заготовки, mm<sup>2</sup>.



**Рис. 1.** Микроструктура литой оловянной бронзы БрО12 с хрупкими включениями (эвтектоид,  $\text{Cu}_3\text{P}$ ,  $\text{SnO}_2$ ): *а, б* – до деформации, *в* – после деформации осадкой при  $\varepsilon = 30\%$ ;  $\times 200$

С целью изучения влияния деформации осадкой на свойства прессовок крупных сечений была разработана маршрутная технология и рассчитаны основные параметры осадки для бронзы БрО12 с диаметром исходной заготовки 114 mm.

Осадку заготовок проводили со степенью деформации  $\varepsilon = 20\text{--}30\%$  и последующим отжигом при температурах 100 и 350°C. Анализ результатов механических испытаний и исследование микроструктуры бронзы, упрочненной осадкой, позволили определить оптимальные условия деформации и температуры отжига. При  $\varepsilon = 30\%$  хрупкая составляющая бронзы дробится и измельчается, создавая этим самым более однородную структуру (рис. 1, *в*).

Осадка при  $\varepsilon = 30\%$  и последующий отжиг при 350°C обеспечивают достаточно высокие прочность и пластичность по сравнению с литым состоянием (табл. 1).

Таблица 1

**Зависимость механических свойств оловянной бронзы БрО12 от степени деформации осадкой и температуры отжига**

Состояние материала	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0.2}$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Относительное сужение $\psi$ , %	Твердость НВ
Литое	280	–	8	–	90
Деформируемое осадкой с отжигом: $\varepsilon = 20\%$ , $T = 100^\circ\text{C}$	460	405	8	25	155–161
$\varepsilon = 20\%$ , $T = 350^\circ\text{C}$	445	373	12.2	24	143–144
$\varepsilon = 30\%$ , $T = 100^\circ\text{C}$	507	476	9.75	21	170–180
$\varepsilon = 30\%$ , $T = 350^\circ\text{C}$	480	390	10.4	24	150–165

Образцы для исследований вырезали из центра и края заготовок. Более равномерная деформация заготовок крупных сечений наблюдается на периферии. Равномерности упрочнения по сечению заготовки достигали, используя различные смазки на торцах заготовок и деформирующего инструмента.

**Испытание деформированного материала на износ,  
усталость и работоспособность**

Усталостные испытания упрочненных образцов диаметром 10 mm, полученных по оптимальной технологии, проводили на усталостной машине МУИ-6000 при круговом изгибе с частотой нагружения 50 Hz [3,4]. В качестве предела выносливости принимали такой уровень напряжений  $\sigma_{-1}$ , при котором хотя бы два образца из трех не разрушались до отработки полного цикла нагружений ( $N_8 = 10^8$ ). Результаты усталостных испытаний приведены в табл. 2.

Таблица 2

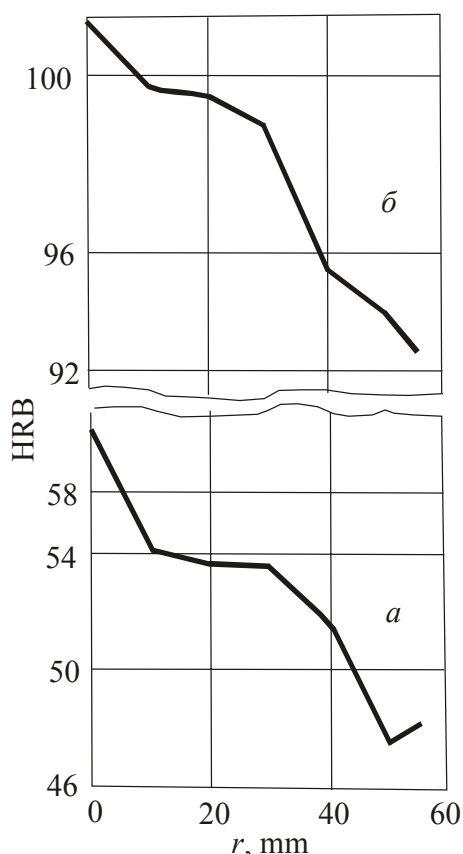
**Результаты испытаний на усталость**

Степень деформации $\epsilon, \%$	Предел выносливости $\sigma_{-1}, \text{MPa}$	Относительное увеличение $\Delta, \%$
0	140	–
20	200	43
30	210	50

В целях определения неоднородности упрочнения материала по сечению, перпендикулярному оси заготовки диаметром 110 mm, были проведены измерения твердости в радиальном направлении от поверхности заготовки к центру с шагом 10 mm. Характер распределения твердости (рис. 2) после осадки аналогичен исходному, что подтверждает наличие объемного упрочнения.

Кроме того, были проведены испытания на разрыв (внутренним статистическим давлением) втулок, изготовленных из упрочненной и неупрочненной бронзы, с размерами: внутренним диаметром 25 mm, толщиной стенки 1 mm, длиной 70 mm. Испытания проводили в специальной камере с двумя каналами, один из которых соединен с насосной станцией, создающей давление до 45 MPa, а другой – с дренажем. Давление изменяли со скоростью 0.1 MPa/s. Принимали, что разрушение втулки происходит при давлении, когда начинается дренаж масла через второй канал. Испытания 5 упрочненных и 5 неупрочненных втулок показали, что среднее давление разрыва было соответственно 34.8 и 8.6 MPa.

Завершающей стадией экспериментальных исследований были предварительные сравнительные функциональные испытания блоков цилиндров из неупрочненных и упрочненных заготовок из БрО12 в составе сдвоенных насосов [4]. Были испытаны два насоса. В правой секции одного из них и в левой – другого были установлены упрочненные блоки цилиндров, в остальных секциях насоса – серийные. Перед сборкой насосов измерены геометри-



**Рис. 2.** Характер распределения твердости в заготовке литой оловянной бронзы БрО12 диаметром 110 мм: *a* – исходное литое состояние, *б* – после осадки

показали, что для неупрочненного блока средний износ был равен соответственно 0.01 и 0.06 мм, для упрочненного при оптимальном технологическом режиме – 0.004 и 0.023 мм.

Полученные результаты по упрочнению осадкой заготовок крупных сечений дают основание заключить, что деформация по этой схеме обеспечивает достаточное повышение прочностных и пластических характеристик литой бронзы, исключая при этом появление трещин и расслоений и являясь более простой схемой деформации в практическом ее использовании.

### Выводы

1. Технология гидропрессования литых цветных сплавов применительна только для сечений, не превышающих 40 мм. Гидропрессование крупногабаритных заготовок приводит к появлению трещин и расслоений.

2. Причиной охрупчивания заготовок из оловянной бронзы БрО12 большого диаметра являются неравномерно распределенные скопления хрупкой фазы эвтектоида и других хрупких включений.

ческие размеры сопрягаемых поверхностей поршней, блоков цилиндров и распределителей. После проведения приемо-сдаточных испытаний оба насоса были проверены на стенде для ресурсных испытаний при постоянном длительно действующем давлении 30 МПа и номинальной частоте вращения. После 40 h эксплуатации в первом насосе произошел разрыв серийного блока по перемычкам на 1/3 длины блока цилиндра. Упрочненный блок цилиндра отработал в этом насосе 112.5 h. Оба блока цилиндра второго насоса отработали при тех же режимах испытаний 105.2 h без отклонений от паспортных характеристик.

По окончании испытаний второго насоса специальным приспособлением измерили износ обоих блоков цилиндров на сопряженной с распределителем сферической торцевой поверхности. Износ оценивали как среднее арифметическое разности показаний индикатора приспособления до испытаний и после наработки 112.5 h, вычисленных для 8 точек. Определение износа сфер блоков в радиусе зоны измерения 14.5 и 36 мм показали, что для неупрочненного блока средний износ был равен соответственно 0.01 и 0.06 мм, для упрочненного при оптимальном технологическом режиме – 0.004 и 0.023 мм.

3. Крупногабаритные заготовки из оловянной бронзы БрО12 целесообразно упрочнять механической осадкой.

4. Реализация технологии деформирования крупногабаритных заготовок из БрО12 методом осадки при  $\varepsilon = 30\%$  и последующего отжига при  $350^\circ\text{C}$  обеспечивает повышение комплекса эксплуатационных характеристик литого сплава: прочности – в 1.7 раза, пластичности – в 1.3, износостойкости – в 2.5 раза и усталостной долговечности – в 1.4–1.6 раза.

1. В.П. Саакьянц, В.С. Ковико, Е.Н. Высоцкий, МиТОМ № 9, 52 (1989).
2. Е.Н. Высоцкий, В.П. Саакьянц, В.С. Ковико, XIV научн. семинар «Влияние высоких давлений на вещество», Киев, 1991 г.
3. Б.Н. Бирюков, С.А. Медведев, В.Г. Станиславский и др., Строительные и дорожные машины № 4, 13 (1990).
4. С.В. Серенсен, М.Э. Гарф, В.А. Кузьменко, Динамика машин для испытаний на усталость, Машиностроение, Москва (1967).

*E.N. Vysotsky*

#### TECHNOLOGICAL FEATURES OF PRODUCTION OF LARGE-DIMENSIONAL ARTICLES FROM CAST TIN BRONZE

The presence of nonuniformly distributed fragile phase, eutectoid, as well as of the admixtures forming fragile precipitates with copper in the cast tin bronze cause the embrittlement during the deformation processing. The hydropressing permits to deform these low-ductile materials but only for products diameters not exceeding 40 mm. At the pressing of the large-dimensional billets the most simple scheme of the cast tin bronze strengthening was used, i.e. upsetting, that eliminates cracking and exfoliation and increases the ductility and strength of the cast tin bronze.

**Fig. 1.** Microstructure of cast tin bronze БрО12 with brittle inclusions (eutectoid,  $\text{Cu}_3\text{P}$ ,  $\text{SnO}_2$ ): *a*, *b* – prior to deformation, *c* – after upsetting for  $\varepsilon = 30\%$ ;  $\times 200$

**Fig. 2.** Character of hardness distribution in a 110 mm-diameter billet from cast tin bronze БрО12: *a* – as-cast state, *b* – after upsetting