
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА.
ДИАГНОСТИКА ИСПЫТАНИЯ**

УДК 621.73

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-СКОРОСТНЫХ РЕЖИМОВ
ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРУ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ГИБРИДНЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ**

© 2022 г. П. А. Петров^{1,*}, И. А. Бурлаков^{1,2}, Фам Ван Нгюк¹,
Нгуен Хань Тоан¹, Во Фан Тхань Дат¹, Р. Ю. Сухоруков³

¹Московский политехнический университет, Москва, Россия

²Производственный комплекс “Салют” АО “ОДК”, Москва, Россия

³Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

*e-mail: petrov_p@mail.ru

Поступила в редакцию 31.03.2022 г.

После доработки 24.05.2022 г.

Принята к публикации 21.06.2022 г.

Приведены результаты исследований по влиянию температурно-скоростных режимов и граничных условий осадки с кручением на формирование структуры алюминиевого сплава АМг5 в температурном интервале 20–450°C, титанового сплава ОТ4-1 и медного сплава БрХ0.8 в температурном интервале 20–800°C при осадке со скоростями $\dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-1}$, 10^{-2} и 10^{-3} с⁻¹. Полученные результаты изучения влияния температурно-скоростных режимов на микроструктуру материалов позволили определить рациональные режимы изготовления и получить гибридные заготовки осадкой с кручением из исследуемых материалов с высоким качеством соединения в зоне контакта.

Ключевые слова: микроструктура, алюминиевые сплавы АМг2, АМг3, АМг5, АМг6, технический титан ВТ1-0, титановый сплав ОТ4-1, медный сплав БрХ0.8, температурно-скоростные режимы деформации

DOI: 10.31857/S0235711922050121

Промышленность в больших количествах потребляет цветные сплавы, в том числе на базе алюминия, титана и меди. Заготовки из таких сплавов получают с применением методов горячей и холодной пластической деформации – прокатки,ковки,штамповки, ротационных методов и т.п. В процессе пластического формообразования структура сплавов претерпевает изменения, преимущественно зависящие от температуры металла в процессе обработки, скорости и величины деформации. Учитывая существенное влияние структурного состояния металла на эксплуатационные свойства изделия указанные параметры должны учитываться при разработке технологического процесса и выборе режимов обработки. Например, наилучшее сочетание механических свойств титановых сплавов обеспечивают мелко- и среднезернистые структуры [1]. В настоящее время недостаточно систематизированных и полученных по одной методике экспериментальных данных о структурных изменениях в процессе горячей и холодной деформации ряда широко применяемых цветных сплавов, в частности, алюминиевого сплава АМг5, технического титана ВТ1-0, титанового сплава ОТ4-1, медного сплава БрХ0.8.

Целью настоящей статьи являлось изучение влияния температурно-скоростных режимов на структурообразование применяемых в машиностроении цветных сплавов трех групп – алюминиевых, титановых и медных.

Характеристики и свойства исследуемых материалов:

Алюминиевые сплавы характеризуются низкой плотностью и высокой технологичностью. Они хорошо обрабатываются как в горячем, так и холодном состоянии. Уровень механических и технологических свойств алюминиевых сплавов определяется не только химическим составом, а также структурой, которая может быть некристаллизованной, смешанной и кристаллизованной [2]. Наибольший интерес представляют сплавы алюминия с магнием – АМг2, АМг3, АМг5 и АМг6.

Титановые сплавы известны как материалы, сочетающие низкую плотность при высоких прочностных характеристиках. Материал находит широкое применение в авиакосмической промышленности. К деформируемым титановым сплавам относятся технический титан ВТ1-0 и низколегированный титановый сплав ОТ4-1. Многообразие структур титановых сплавов определяет изменение их механических свойств в широких пределах. Влияние микроструктуры на свойства сплавов по отдельным характеристикам превышает эффект влияния химического состава и путем оптимизации микроструктуры сплавов можно добиться реализации существенных резервов их механических и технологических свойств [3].

Сплавы на основе меди получили широкое распространение благодаря их высокой пластичности и коррозионной стойкости. В отожженном состоянии они обладают высокими пластическими характеристиками, а пластическая деформация значительно повышает прочностные свойства при резком падении пластичности. Одним из распространенных сплавов является хромистая бронза БрХ0,8, содержащая медь как основу и 0,4–0,7 процента хрома. Данный сплав применяют для изготовления деталей, сочетающих высокую теплопроводность и электропроводность с жаропрочностью.

Материалы, оборудование и методы исследования. Исходными материалами являлись алюминиевые сплавы АМг2, АМг3, АМг5 и АМг6, технически чистый титан ВТ1-0 и титановый сплав ОТ4-1 и медный сплав БрХ0,8. В настоящей статье сплав АМг5 выбран типовым представителем группы сплавов системы Al–Mg и, далее, результаты приводятся для сплава АМг5.

Заготовки для проведения исследований представляли собой цилиндрические образцы диаметром и высотой 10 мм, полученные электроэрозионной резкой. Испытание на сжатие проводили на машине модели LFM250 со скоростями деформации $\dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-1}$, 10^{-2} и 10^{-3} с^{-1} при температурах 20, 400, 600 и 800°C. Температура осадки для заготовок из алюминиевых сплавов составляла 20, 300, 400 и 450°C при тех же скоростях деформации. Величина деформации составляла 50%. Скорость деформации поддерживалась постоянной за счет управляемого перемещения траверса машины. Металлографические исследования осуществляли на бинокулярном микроскопе Olympus Delta с увеличениями 50, 100, 500 и 1000. Исследуемые микрошлифы были изготовлены резкой образцов в меридиональном сечении вдоль направления деформации.

Результаты и обсуждение. Алюминиевые сплавы АМг2, АМг3, АМг5 и АМг6 относят к группе магналиев. Уровень механических свойств в значительной степени определяется количеством магния в сплаве [4]. В сплаве АМг2 количество магния составляет 1,8–2,6%, в сплаве АМг5 – 4,8–5,8% и в сплаве АМг6 – 5,8–6,8%. Сплавы применяют для сварных и несварных малонагруженных изделий, от которых требуется повышенная коррозионная стойкость. Типовая структура исходного образца имеет мелкодисперсное строение с наличием фазовых составляющих, ориентированных вдоль направления прокатки прутка. Зарождение дисперсионных выделений (зоны Гинье–Престона) в сплавах Al–Mg, содержащих менее 6% магния затруднено. Поэто-

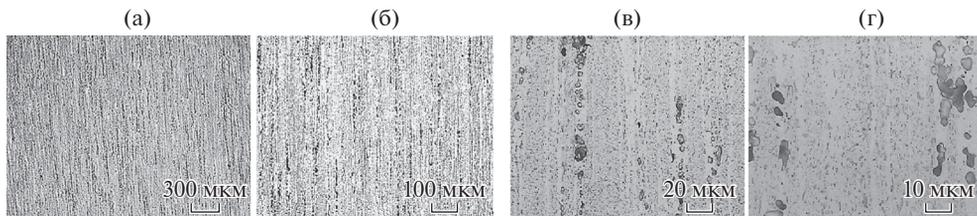


Рис. 1. Структура исходного образца сплава АМг5: (а) – увеличение $\times 50$; (б) – увеличение $\times 100$; (в) – увеличение $\times 500$; (г) – увеличение $\times 1000$.

му распад обычно происходит с возникновением сравнительно небольшого количества грубых включений [2], что хорошо видно на рис. 1.

Al-Mg сплавы во всех состояниях имеют структуру пересыщенного твердого раствора, для которых характерен одновременный рост как прочности, так и пластичности по мере повышения содержания магния. Рассмотрим структурообразование на примере выбранного сплава-представителя – сплава АМг5.

Сплав АМг5. Структура исходного образца сплава АМг5 однородная с отдельными включениями вдоль линий тока материала. Режимы обработки (температура $20\text{--}450^\circ\text{C}$ и скорости деформации при значениях – $0.001, 0.01, 0.4\text{ с}^{-1}$) и полученная микроструктура приведены на рис. 2 (увеличение $\times 500$).

Наиболее существенное влияние на структуру (рис. 2) оказывает температура. С ростом температуры от 20 до 450°C наблюдается интенсивное выделение фаз вдоль линий течения металла. Влияние скорости деформации заметно только при повышенных температурах (400 и 450°C). Это связано с влиянием дополнительного тепла, выделяющегося при высоких температурах деформации. Однако стоит отметить, что сам по себе тепловой эффект пластической деформации при сжатии цилиндрического образца не значительный и не приводит к существенному снижению напряжения текучести деформируемого материала.

Титановые материалы ВТ1-0 и ОТ4-1 нашли широкое применение благодаря повышенной пластичности в отожженном состоянии. Учитывая, что технический α -титан ВТ1-0 и псевдо- α -титан ОТ4-1 обладают хорошей свариваемостью, их можно использовать для изготовления гибридных заготовок.

Технический α -титан ВТ1-0. Сплав ВТ1-0 применяют для изготовления малонагруженных деталей сложной конфигурации, работающих при невысоких до 150°C и при низких вплоть до криогенных температурах.

Микроструктура образцов исходного материала в обоих сечениях полиэдрическая и разнородная. Размер зерен составляет $30\text{--}40\text{ мкм}$ (рис. 3).

После деформации наблюдается измельчение структуры до размера зерен $2\text{--}3\text{ мкм}$ (рис. 4), при этом микротвердость [5] и прочностные свойства увеличиваются в $1.3\text{--}1.5$ раза [6].

Можно предположить, что изменение структуры исходных зерен титана в процессе деформации аналогично изменениям, происходящим при деформации любых однофазных сплавов с объемно-центрированной кубической (о.ц.к.) решеткой [3].

Псевдо- α -титан ОТ4-1. Псевдо- α -сплавы, представителем которых является ОТ4-1, получили широкое распространение в отечественной промышленности. Их достоинствами является удовлетворительная технологическая пластичность при пластическом формообразовании заготовок и хорошая свариваемость. Единственным видом термической обработки является отжиг. Полный отжиг проводится при $640\text{--}690^\circ\text{C}$, неполный отжиг – при $520\text{--}560^\circ\text{C}$. Рекомендуемым температурным интервалом ре-

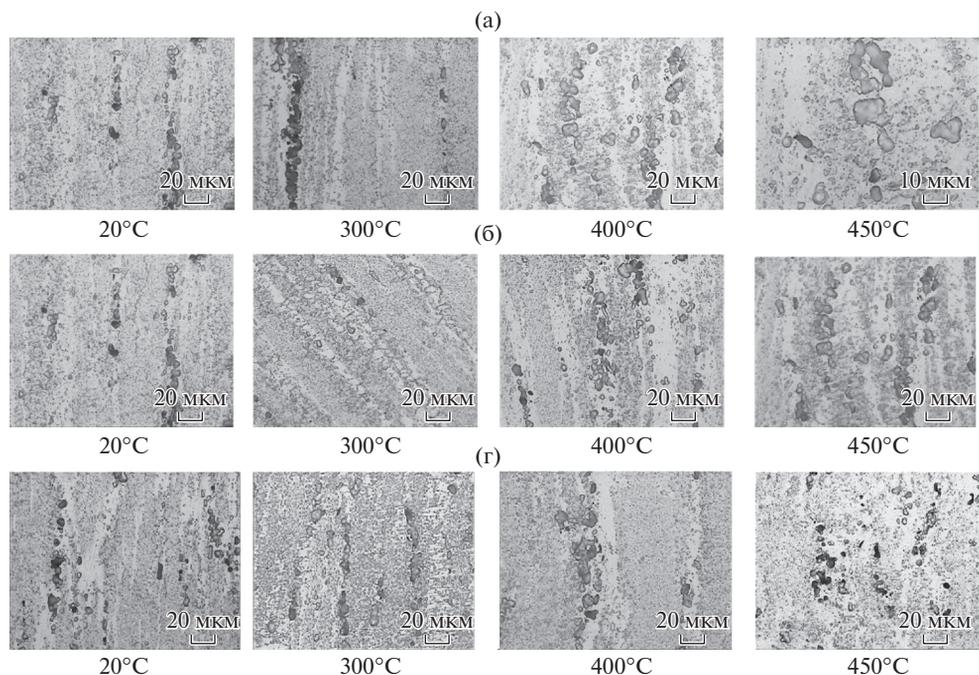


Рис. 2. Изменение микроструктуры в образцах сплава АМг5 в зависимости от температуры и скорости деформации: (а) – $\dot{\epsilon} = 0.001 \text{ c}^{-1}$; (б) – $\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ c}^{-1}$; (в) – $\dot{\epsilon} = 0.4 \text{ c}^{-1}$.

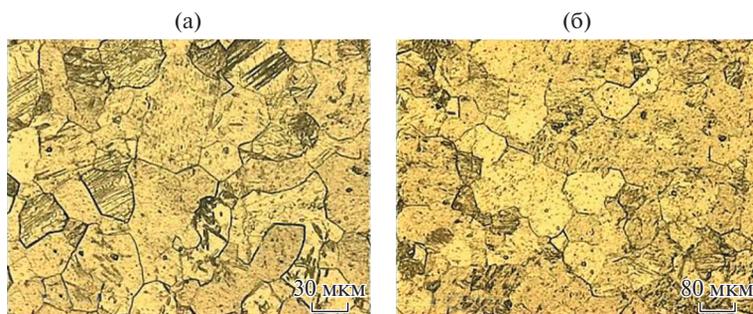


Рис. 3. Микроструктура материала исходного образца титана ВТ1-0: (а) – продольное сечение; (б) – поперечное сечение.

кристаллизационного отжига является диапазон $750\text{--}800^\circ\text{C}$, при котором происходит полное разупрочнение титана [1].

Сплав марки ОТ4-1 – низколегированный сплав, микроструктура заготовок которых в состоянии поставки, как правило, характеризуется однородностью, размеры зерен составляют $10\text{--}20 \text{ мкм}$ (рис. 5).

Как показывает анализ микроструктуры после холодной осадки (20 и 400°C) в структуре α -сплава почти не наблюдаются признаки деформации, что свидетельствует

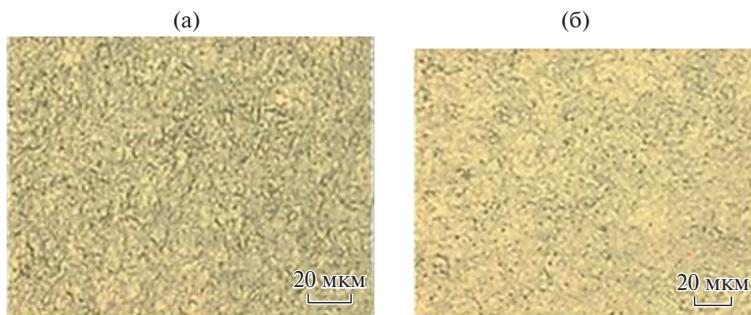


Рис. 4. Микроструктура титана ВТ1-0 после интенсивной накопленной логарифмической деформации $\epsilon \sim 2.5$: (а) – продольное сечение; (б) – поперечное сечение.



Рис. 5. Структура исходного образца, увеличение $\times 100$.

о внутризеренном механизме деформации при осадке заготовок. При повышении температуры формоизменения до 600°C происходит течение металла вдоль границ зерен и их вытягивание вдоль направления течения. Однако при скорости деформации 0.4 c^{-1} удлинение зерен выражено менее заметно, что, по всей видимости, связано с повышением температуры и началом рекристаллизации. При температуре деформации 800°C , в связи с завершением рекристаллизации, образуется равноосная структура (рис. 6).

Хромистая бронза БрХ0.8. Микроструктура сплава (рис. 7) представляет собой полиэдрические зерна без неметаллических включений. Результаты рентгеноструктурного металлографического анализа позволили определить выделения фазовых составляющих в виде строчек на основе кремния и хрома, которые не оказывают заметного влияния на формообразующие операции.

Структуры образцов после пластической деформации с различными значениями температуры и скоростями деформации приведены на рис. 8.

Изучение микроструктуры позволило установить, что при комнатной температуре скорость деформации оказывает существенное влияние на структуру, проявляющуюся в формировании более мелких зерен при большей скорости. Влияние скорости деформации на изменение структуры и снижение микротвердости (рис. 9) особенно заметно при температуре свыше 600°C , что связано с началом рекристаллизации зерен. Замер микротвердости проводился при комнатной температуре для цилиндрических

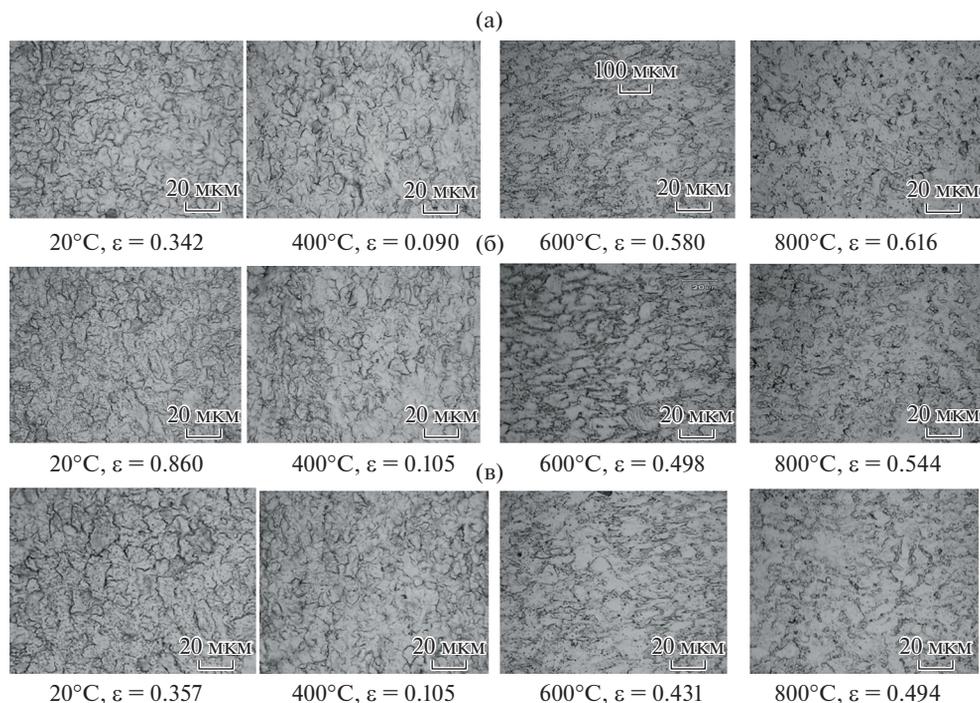


Рис. 6. Изменение микроструктуры в образцах сплава ОТ4-1 после деформации, увеличение $\times 1000$: (а) – $\dot{\varepsilon} = 0.001 \text{ c}^{-1}$; (б) – $\dot{\varepsilon} = 0.01 \text{ c}^{-1}$; (в) – $\dot{\varepsilon} = 0.4 \text{ c}^{-1}$.



Рис. 7. Микроструктура исследуемого образца сплава BrX0,8 в продольном сечении: (а) – увеличение $\times 100$; (б) – увеличение $\times 500$.

образцов, осажженных при температуре 600°C на 50% исходной высоты. Сжатие образцов (“Материалы, оборудование и методы исследования”) выполнено со скоростью деформации 0.001, 0.01 и 0.4 c^{-1} . Микротвердость измеренная на образцах, осажженных при температуре 800°C , практически совпадает со значениями микротвердости, представленными на рис. 9.

Таким образом, результаты проведенных исследований влияния температурно-скоростных режимов на микроструктуру сплавов с учетом полученных эксперимен-

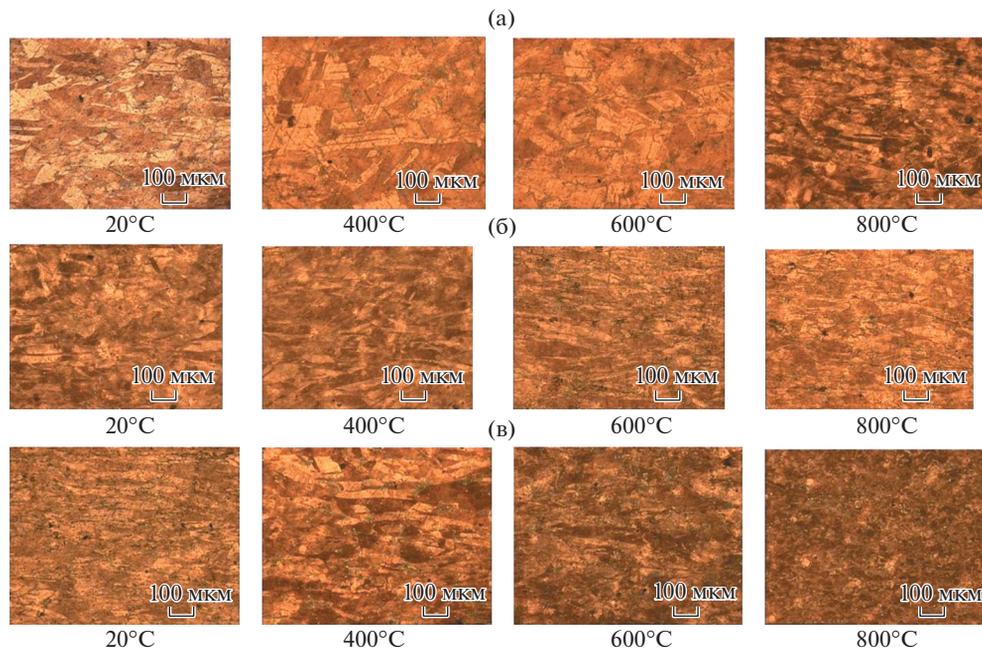


Рис. 8. Изменение микроструктуры в образцах сплава БрХ0,8 после деформации, увеличение $\times 100$: (а) – $\dot{\epsilon} = 0.001 \text{ с}^{-1}$; (б) – $\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ с}^{-1}$; (в) – $\dot{\epsilon} = 0.4 \text{ с}^{-1}$.

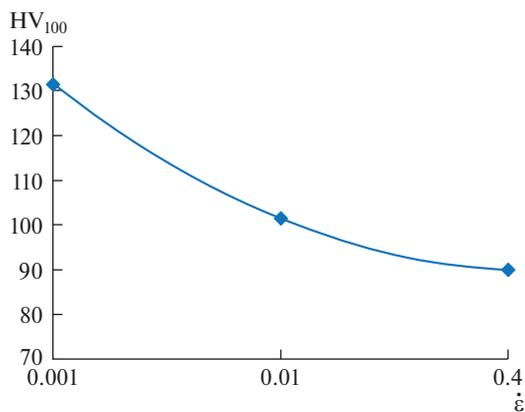


Рис. 9. Изменение микротвердости (HV_{100}) в зависимости от скорости деформации (для образцов после сжатия при температуре 600°C).

тальных данных, а также использования реологических моделей сплавов и эффективного применения моделирования программой QForm создают методологическую базу для развития технологических процессов изготовления гибридных заготовок из цветных сплавов. Одним из направлений совершенствования технологий является деформирование комбинированным нагружением осевым и вращательным перемещением

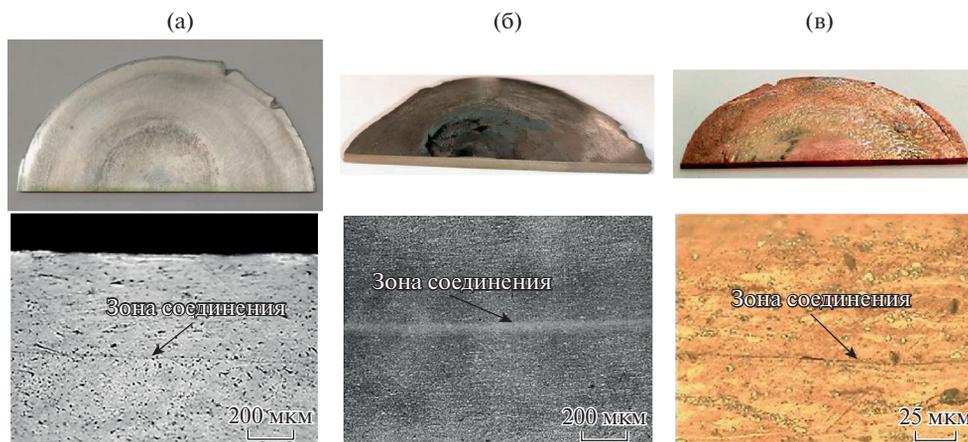


Рис. 10. Гибридные заготовки, полученные осадкой с кручением: (а) – сплав АМг6, увеличение $\times 100$, (после травления); (б) – титановый сплав ОТ4-1, увеличение $\times 100$, (после травления); (в) – сплав БрХ0,8, увеличение $\times 500$, (после травления).

верхнего инструмента (пуансона) на специализированных установках [9, 10]. Экспериментально получены гибридные (составные) заготовки путем осадки с кручением на модернизированном гидравлическом прессе модели ДБ-2432 силой 1.6 МН [11] из исследуемых материалов с высоким качеством соединения в зоне контакта (сплав АМг6, титановый сплав ОТ4-1, медный сплав БрХ0,8) (рис. 10), что коррелирует с результатами ученых ИФМ Уро РАН (г. Екатеринбург) о фазовых превращениях на атомном уровне в соединениях, которые возникают при воздействии интенсивной деформации [12]. Как показали ранее проведенные исследования реологических характеристик титанового сплава [13], формообразование заготовок из титанового сплава ОТ4-1 необходимо осуществлять при температуре 600–650°C для получения наилучшего качества при соединении заготовок пластическим деформированием. Примеры составных заготовок представлены на рис. 10.

Выводы. Исследования показали, что изучение структурных изменений в зависимости от температурно-скоростных параметров в диапазоне температур 20–450°C для алюминиевых сплавов АМг2, АМг3, АМг5, АМг6 и 20–800°C для сплава ОТ4-1 и медного сплава БрХ0.8 при осадке со скоростями $\dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-1}$, 10^{-2} и 10^{-3} с^{-1} позволило: **1)** определить эволюцию структур, позволившую определить рациональные режимы формообразования гибридных заготовок из изучаемых материалов; **2)** получить гибридные (составные) заготовки осадкой с кручением из исследуемых материалов с высоким качеством соединения (рис. 10) заготовок из нескольких широко применяемых в машиностроении цветных сплавов трех групп – алюминиевых (АМг2, АМг3, АМг5, АМг6), технического титана ВТ1-0, титанового сплава ОТ4-1 и медного сплава БрХ0.8.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Агарков Г.Д., Каганович И.Н., Польшкин И.С., Тулянкин Ф.В.* Полуфабрикаты из титановых сплавов. М.: Металлургия, 1979. 243 с.
2. *Беляев А.И., Бочвар О.С., Буйнов Н.Н. и др.* Металловедение алюминия и его сплавов. М.: Металлургия. 1983. 280 с.
3. *Аношкин Н.Ф. и др.* Металлография титановых сплавов. М.: Металлургия, 1980. 464 с.
4. *Фридляндер И.Н.* Высокопрочные деформируемые алюминиевые сплавы. М.: Оборонгиз, 1960. 290 с.
5. *Курзина И.А., Божко И.А., Калашников М.П. и др.* Эволюция структуры и механических свойств ультрамелкозернистого титана // Материаловедение. 2010. № 5. С. 48.
6. *Петров А.Н., Бурлаков И.А., Бач Ву Чонг, Логинов Б.А.* Эволюция микроструктуры технического титана ВТ1-0 при интенсивной пластической деформации // Цветные металлы. 2019. № 6. С. 71.
7. *Власов А.В., Стебунов С.А., Евсюков С.А. и др.* Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объемной штамповки. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. 383 с.
8. *Бурлаков И.А., Петров П.А. и др.* Особенности формообразования полых осесимметричных заготовок из медного сплава БрХ08 с применением ротационных методов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2022. № 4. С. 86.
9. *Щербатов Д.А.* Совершенствование технологии осадки заготовок методом комбинированного нагружения на установке с независимым приводом. Нижний Новгород: Автореферат дисс. ... к.т.н., 2011. 28 с.
10. *Шнейберг А.М. и др.* Пластическая деформация при комбинированном нагружении. Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2018. 249 с.
11. *Субич В.Н. и др.* Штамповка с кручением: Монография. МГИУ, 2008. 389 с.
12. *Shabashov V., Sagaradze V., Kozliv K., Ustyugov Y.* Atomic order and submicrostructure in iron alloys at megaplastic deformation // Metals. 2018. V. 8 (12). P. 995.
13. *Петров П.А., Бурлаков И.А., Нгуен Хань Тоан, Сухоруков Р.Ю.* Управление процессами формообразования заготовок из титановых сплавов (на примере сплава ОТ4-1) с использованием моделирования реологии и режимов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2021. № 6. С. 88.