

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОДНОРОДНОСТИ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ НА ПОКАЗАТЕЛИ ПРИГОДНОСТИ К ОПЕРАЦИЯМ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ СПЛАВОВ АМг2 И АМг6

© 2019 г. Е.А. Носова, А.А. Фадеева, М.А. Стародубцева

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

Статья поступила в редакцию 18.06.18 г., доработана 15.12.18 г., подписана в печать 20.12.18 г.

Качество изделий, получаемых из листовых алюминиевых сплавов, сильно зависит от технологических особенностей процесса листовой штамповки, а также от структуры листовых полуфабрикатов. Размер зерна и однородность зеренной структуры – одни из ключевых структурных особенностей, влияющих на показатели штампуемости. Предложен метод и выполнена оценка однородности зеренной структуры. Оценка штампуемости сплавов АМг2 и АМг6 проводилась на основании измерений показателя упругой отдачи, минимального радиуса гибки, определения числа текучести, показателя деформируемости по Мартенсу. Путем холодной деформации (со степенью деформации 20 %) и последующего рекристаллизационного отжига при температурах 250, 350 и 450 °С в течение 1 ч получена зеренная структура размером $(26,8 \pm 7,4) \div (126 \pm 43)$ мкм (сплав АМг6) и $(120 \pm 11) \div (264 \pm 130)$ мкм (сплав АМг2). В результате обработки выявлена роль исходного размера зерна: более крупнозернистая структура сплава АМг2 привела к более крупному зерну после деформации и отжига. Установлено, что с ростом размера зерна в обоих сплавах наблюдаются увеличение показателя по Мартенсу и снижение числа текучести, что свидетельствует о повышении штампуемости сплавов в вытяжных операциях листовой штамповки. С ростом размера зерен в сплаве АМг2 показатель упругого последействия уменьшается в 1,5–1,7 раза, а минимальный радиус гибки увеличивается, а в сплаве АМг6 показатель упругого последействия повышается в 1,1–1,2 раза, а минимальный радиус гибки снижается. Минимальный радиус гибки у сплава АМг6 остается выше, чем в сплаве АМг2, независимо от размера зерна. Разнозернистость в сплаве АМг6 вызывает рост показателя по Мартенсу и минимального радиуса гибки, уменьшение числа текучести, а в сплаве АМг2 – увеличение показателя по Мартенсу и минимального радиуса гибки, снижение числа текучести. С увеличением разнозернистости наблюдается большой разброс данных для показателя упругой отдачи. В сплаве АМг6 низкая температура отжига привела к сохранению нерекристаллизованной структуры, что повлияло на снижение штампуемости.

Ключевые слова: размер зерен, алюминиевые сплавы, рекристаллизация, листовая штамповка, число текучести, упругое последействие, минимальный радиус гибки, показатель по Мартенсу.

Носова Е.А. – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения Самарского университета (443086, г. Самара, Московское шоссе, 34). E-mail: eanosova@mail.ru.

Фадеева А.А. – студентка Института авиационной техники Самарского университета.
E-mail: anastasiafadeeva95@gmail.com.

Стародубцева М.А. – студентка Института авиационной техники Самарского университета.
E-mail: masha.199419@mail.ru.

Для цитирования: Носова Е.А., Фадеева А.А., Стародубцева М.А. Исследование влияния однородности зеренной структуры на показатели пригодности к операциям листовой штамповки сплавов АМг2 и АМг6. *Изв. вузов. Цвет. металлургия.* 2019. No. 3. С. 47–54. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2019-3-47-55.

Nosova E.A., Fadeeva A.A., Starodubtseva M.A.

Research of grain size homogeneity effect on sheet stamping ability characteristics of Al2Mg and Al6Mg alloys

The quality of products made of sheet aluminum alloys strongly depends on the technological features of the sheet stamping process, as well as on the structure of sheet semi-finished products. The grain size and grain structure uniformity are among the key structural features that influence stampability. A method is proposed and the homogeneity of the grain structure is evaluated. Stampability of Al2Mg and Al6Mg aluminium alloys was evaluated based on measurements of the spring back index, minimum bending radius, stamping ratio, and Martens strain index. Cold work (with a strain degree of 20 %) and subsequent recrystallization annealing at temperatures of 250, 350 and 450 °C for 1 h were used to obtain a grain structure of $(26,8 \pm 7,4) \div (126 \pm 43)$ μm (Al6Mg alloy) and $(120 \pm 11) \div (264 \pm 130)$ μm (Al2Mg alloy) in size. As a result of processing, the effect of the initial grain size was revealed: the coarser structure of the Al2Mg alloy led to a larger grain size after strain and annealing. It was found that an increase in the grain size in both alloys leads to an increase in the Martens index and a decrease in the stamping ratio, which indicates higher stampability of the alloys

in the drawing operations of sheet stamping. In the Al2Mg alloy, an increase in the grain size leads to a decrease in the spring back index by 1,5–1,7 times, and an increase in the minimum bending radius. In the Al6Mg alloy, an increase in the grain size leads to an increase in the spring back index by 1,1–1,2 times, and a decrease in the minimum bending radius. The Al6Mg minimum bending radius remains higher compared to Al2Mg regardless of the grain size. Grain size inhomogeneity in the Al6Mg alloy causes an increase in the Martens index and minimum bending radius, and a decrease in the stamping ratio. In the Al2Mg alloy, grain size inhomogeneity causes an increase in the Martens index and minimum bending radius, and a decrease in the stamping ratio. For the spring back index, the increase in grain size inhomogeneity causes a high scatter of data. In the Al6Mg alloy, the low annealing temperature led to the preservation of the non-recrystallized structure, which influenced the decrease in stampability.

Keywords: grain size, aluminum alloys, recrystallization, sheet forming, stamping ratio, spring back, minimum bending radius, Martens index.

Nosova E.A. – Cand. Sci. (Tech.), associate prof. of the Department of metal technology and aviation materials science, Samara University (443086, Russia, Samara, Moskovskoe shosse, 34). E-mail: eanosova@mail.ru.

Fadeeva A.A. – student of Aviation Devices Institute, Samara University. E-mail: anastasiafadeeva95@gmail.com.

Starodubtseva M.A. – student of Aviation Devices Institute, Samara University. E-mail: masha.199419@mail.ru.

Citation: Nosova E.A., Fadeeva A.A., Starodubtseva M.A. Research of grain size homogeneity effect on sheet stamping ability characteristics of Al2Mg and Al6Mg alloys. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2019. No. 3. P. 47–54 (In Russ.).
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2019-3-47-55.

Введение

Качество изделий, получаемых из листовых алюминиевых сплавов, в значительной мере зависит от технологических особенностей процесса листовой штамповки, а также от структуры листовых полуфабрикатов. Было установлено [1–3], что размер зерна оказывает существенное влияние на механические свойства листов и изделий из них. В работе [4] проведена оценка влияния размерного эффекта на обрабатываемость материалов при штамповке, механическом точении и шлифовании.

В исследовании [5] показано, что увеличение размера зерна в алюминиевом сплаве АА6061 (АД31) от 170 до 300 мкм привело к образованию более крупных рельефных складок на поверхности нагруженных кристаллов. Появление складок на поверхности может способствовать росту шероховатости поверхности листовых заготовок и ускоренному износу штампов [6]. С другой стороны, мелкозернистая структура листовых материалов может приводить к повышению предела текучести согласно закону Холла—Петча и способствовать ускоренному износу штамповых материалов [7], особенно при реализации вытяжных операций.

Типичной зоной для оценки зеренной структуры листовых материалов в работах, посвященных этой тематике, являются как боковая, так и лицевая поверхности. Так, в исследованиях [3, 4] оценку размера зерна проводили относительно толщины листового образца, но в случае крупнозернистой структуры, когда размер зерна больше толщины листа, величину размера зерна оценива-

ли на лицевой поверхности. Российский стандарт ГОСТ 21631-76 «Листы из алюминия и алюминиевых сплавов» предусматривает оценку зеренной структуры на лицевой поверхности листовых образцов.

В большинстве работ влияние однородности зеренной структуры на свойства материалов рассматривается только в связи со структурными изменениями при нагреве и охлаждении сталей. Что касается алюминиевых сплавов, то в публикациях [8, 9] приведены результаты теоретического расчета режимов нагрева и деформации для получения ультрамелкозернистой равноосной структуры на примере сплава АМг5. Показано, что такая структура необходима для реализации механизма зернограничного проскальзывания, характерного для сверхпластичности. Однако расчеты даны только в теории и не реализованы на практике. Автор [10] называет разнородность в металлах нежелательной и описывает возможные механизмы ее возникновения при собирательной рекристаллизации. Однако экспериментальных данных о влиянии разнородности листовых материалов на штампуемость не представлено.

Оценку зеренной структуры и ее однородности в листовых материалах проводили в работах [11, 12]. Для этих целей можно использовать количественную оценку с помощью величины стандартного отклонения согласно ГОСТу 5639.

Оценку штампуемости принято выполнять посредством технологических проб. Например, для вытяжных операций штампуемость оценивают по

значению высоты сферической лунки по Эриксену [13], что регламентировано ГОСТом 10510. Другой технологической пробой предусмотрено определение предельного коэффициента вытяжки. Однако эти испытания не регламентированы, но в справочниках встречаются данные для различных сплавов [14]. Испытания на изгиб [15], условия проведения которых прописаны ГОСТом 14019, позволяют установить значения угла пружинения и минимального радиуса гибки, а следовательно, и возможность реализации гибочных операций для обрабатываемых листов. Кроме технологических проб, оценку штампуемости и деформируемости можно осуществлять с помощью комбинированных показателей — таких, как показатель по Мартенсу, число текучести или кривые предельных деформаций, полученных на основании результатов стандартных испытаний на одноосное растяжение [16, 17].

Деформируемые сплавы системы Al—Mg в виде листов широко используются для получения деталей и узлов в различных отраслях машиностроения: транспортном машиностроении, судостроении, ракетостроении, автомобилестроении и др. [12, 14]. Например, сплав АМг2 применяется для изготовления сосудов и посуды химического назначения, а также в строительстве для быстровозводимых зданий. Сплав АМг6 используют для изготовления элементов надстройки морских и речных судов. Указанные изделия в основном получают методами листовой штамповки, поэтому знание поведения этих материалов в технологических операциях в зависимости от зеренной структуры представляет большой интерес.

В настоящей работе приведены результаты оценки размера зерен и однородности (разнозернистости) структуры и их влияния на показатели упругой отдачи, минимальный радиус гибки, число текучести и показатель деформируемости по Мартенсу для сплавов АМг2 и АМг6.

Методика и материалы

Для исследования применяли холоднокатаные листовые заготовки алюминиевых сплавов АМг6 и АМг2 толщиной 2,5 и 1,3 мм. В качестве предварительной термической обработки использовали полный отжиг для выравнивания свойств по сечению образцов ($t = 410\text{ °C}$ для сплава АМг2 и $t = 330\text{ °C}$ для сплава АМг6) с выдержкой в течение 1 ч и охлаждением на воздухе [14, 18].

Исходный размер зерна на лицевой поверхности заготовок из сплава АМг6 составил $18 \pm 1,3\text{ мкм}$, из сплава АМг2 — $29 \pm 3,5\text{ мкм}$.

Для получения различных размеров зерен в образцах применяли рекристаллизационный отжиг после холодного деформирования. Степень деформации и температуру отжига для получения 3 различных значений размера зерна выбирали на основе диаграмм рекристаллизации [19]. Необходимо было получить как крупнозернистую, так и мелкозернистую структуры, а также различную степень однородности зеренной структуры. Для этого были выбраны стадии начала рекристаллизации, первичной и собирательной рекристаллизации. Образцы прокатывали в холодном состоянии со степенью деформации 20 %. Такую степень обжатия удалось реализовать при холодной прокатке обоих сплавов. При больших обжатиях в листах из сплава АМг6 появлялись боковые трещины.

Образцы отжигали в печи при температурах 250, 350 и 450 °C в течение 1 ч. После отжига из заготовок в продольном направлении вырезали образцы, которые испытывали на одноосное растяжение (ГОСТ 1497). Образцы также подвергали испытаниям на гибку в инструментальном штампе (ГОСТ 14019).

В результате испытаний на одноосное растяжение были получены значения предела прочности (σ_B), предела текучести ($\sigma_{0,2}$) и относительного удлинения (δ). На основании этих данных рассчитывали показатель по Мартенсу:

$$M = (\sigma_B / \sigma_{0,2}) \delta$$

и число текучести:

$$n = \sigma_{0,2} / \sigma_B.$$

Испытания на изгиб проводили в штампе с углом 90° и радиусом скругления 5 мм. После этого гнутые образцы сканировали и проводили измерение их геометрии (угла раскрытия полок) в программе КОМПАС 2D. Коэффициент упругой отдачи рассчитывали по формуле

$$k_{\text{пруж}} = (\alpha_{\text{пр}} - \alpha_{\text{шт}}) / \alpha_{\text{шт}},$$

где $\alpha_{\text{пр}}$ — измеренный угол между полками после гибки, $\alpha_{\text{шт}} = 90^\circ$ — угол штампа.

Далее образцы испытывали согласно ГОСТу 14019-80 до появления первой трещины. Затем снова проводили измерения в указанной программе для получения значения радиуса в очаге

гибки и расчета минимального радиуса гибки по формуле

$$r_{\min} = r_{\text{тр}}/s,$$

где $r_{\text{тр}}$ — радиус скругления профиля в области образования трещины, мм; s — толщина листовой заготовки, мм.

Микроструктуру изучали на лицевой поверхности заготовок, которая при листовой штамповке находится в контакте с деформирующим инструментом. Для этого шлифы заливали в эпоксидную смолу для возможности шлифовки образцов. Затем поверхность обрабатывали наждачной бумагой, шлифовали и полировали. Травление образцов из сплава АМг6 осуществляли 30 %-ным раствором ортофосфорной кислоты (H_3PO_4) в воде при температуре 35 °С в течение 10 мин. Травление образцов из сплава АМг2 проводили в течение 1 мин в растворе: 180 мл H_2O + 180 мл HCl + 120 мл HNO_3 + 30 мл HF и промывали в проточной воде [20].

Микроструктуру исследовали на оптическом микроскопе МЕТАМ РВ (АО «ЛОМО», г. Санкт-Петербург) с оптической системой для фотографирования и проведения простейших геометрических измерений.

Средний размер зерен рассчитывали методом секущих (ГОСТ 5639). Разнозернистость оценивали как стандартное среднеквадратичное отклонение, отнесенное к среднему размеру зерна.

На основании полученных данных были построены графики зависимости числа текучести, показателя по Мартенсу, минимального радиуса гибки, коэффициента упругого последействия от размера зерен и разнозернистости.

Результаты и их обсуждение

Результаты определения предела прочности, условного предела текучести, относительного удлинения исследуемых сплавов приведены в таблице.

На рис. 1 показаны зависимости размера зерна сплавов от температуры отжига. Точки представляют собой результаты замеров, штриховые линии — тенденции изменения полученных данных.

Как видно из рис. 1, в результате рекристаллизационного отжига сплав АМг6 сохранил меньший размер зерна по сравнению с АМг2: в сплаве АМг6 $d_{\text{ср}} = (26,8 \pm 7,4) \div (126 \pm 43)$ мкм, в сплаве АМг2 $d_{\text{ср}} = (120 \pm 11) \div (264 \pm 130)$ мкм. Если обратить-

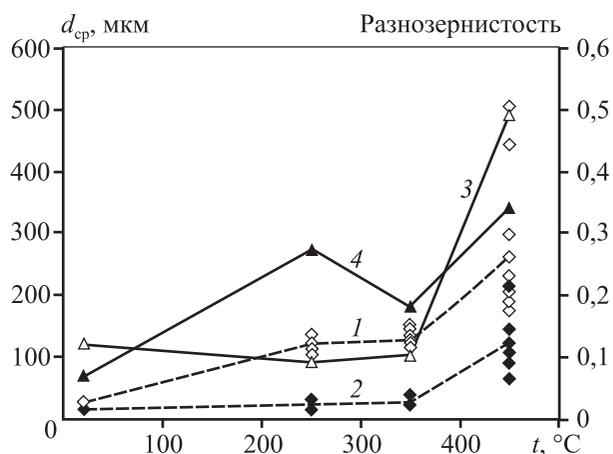


Рис. 1. Изменение размера зерна (1, 2, штриховые линии) и разнозернистости (3, 4, сплошные линии) сплавов АМг2 (1, 3) и АМг6 (2, 4) с ростом температуры отжига

Показатели основных механических свойств образцов из сплавов АМг2 и АМг6 после холодной деформации и отжига

Сплав	Температура отжига, °С	Модуль Юнга E, ГПа	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %
АМг6	250	1,84	336 ± 16	181 ± 7	41 ± 3
	350	1,56	304 ± 20	149 ± 7	40 ± 9
	450	1,66	291 ± 16	117 ± 15	49 ± 9
Согласно ГОСТ 20631 и ОСТ 90155			Не менее 28–32 кгс/мм ² (280–320 МПа)	Не менее 13–16 кгс/мм ² (130–160 МПа)	Не менее $\delta_{10} = 15\%$
АМг2	250	1,25	212 ± 4	118 ± 2,9	20 ± 2
	350	1,19	205 ± 11	116 ± 2,9	25 ± 4
	450	1,05	171 ± 3,5	70 ± 2	25 ± 1
Согласно ГОСТ 21631			Не менее 17 кгс/мм ² (170 МПа)	Не регламентируется	Не менее $\delta_{10} = 16 \div 18\%$

ся к диаграммам рекристаллизации [19], то можно обнаружить, что с повышением содержания магния в сплавах системы Al—Mg наблюдается тенденция к увеличению d_{cp} при условии, что исходное зерно было одинаковым по размеру. Если же перед обработкой давлением и последующим рекристаллизационным отжигом сплав имел более крупное зерно, то и после рекристаллизации материал сохраняет более крупнозернистую структуру. Это же наблюдение совпадает с результатами, полученными в работе [21] для сплава AA5182 (аналога российского сплава АМГ5 по ГОСТу 4784).

Изменение разнотерности на рис. 1 показано ломаной линией, ее также подтверждает разброс значений размера зерна. В сплаве АМГ2 разнотерность находится в пределах 0,12—0,49, в сплаве АМГ6 — в интервале 0,07—0,34. При этом в сплаве АМГ2 разнотерность увеличивается по мере роста температуры, а в сплаве АМГ6 сначала снижается от 0,28 до 0,18, а затем увеличивается до 0,34.

Зависимости минимального радиуса гибки (r_{min}) и числа текучести (n) от размера зерен в сплавах представлены на рис. 2. Видно, что с увеличением размера зерна число текучести снижается в обоих сплавах. Минимальный радиус гибки в сплаве АМГ6 уменьшается по мере увеличения d_{cp} , в то время как в сплаве АМГ2 он растет.

В целом, сплав АМГ6 обладает большим минимальным радиусом гибки и меньшим числом текучести по сравнению со сплавом АМГ2, что демонстрирует хорошую пригодность его мелкозернистой структуры к вытяжным операциям и плохую — к гибочным процессам.

На рис. 3 показаны зависимости показателя по Мартенсу (M) и показателя упругой отдачи ($k_{пруж}$) от среднего размера зерен.

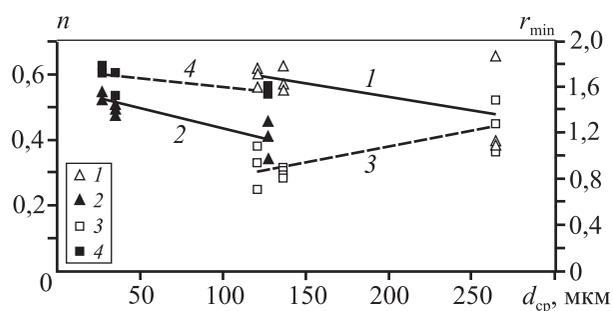


Рис. 2. Зависимости числа текучести (1, 2, сплошные линии) и минимального радиуса гибки (3, 4, штриховые линии) от среднего размера зерен в сплавах АМГ2 (1, 3) и АМГ6 (2, 4)

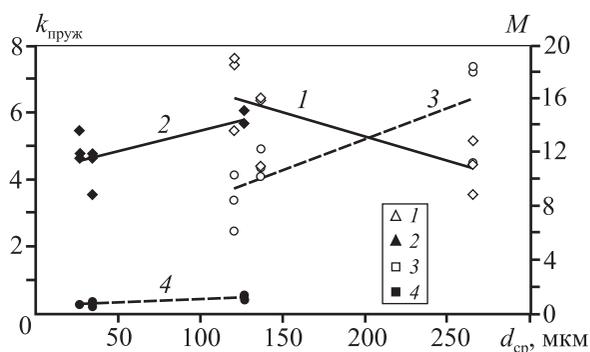


Рис. 3. Зависимости показателя упругой отдачи (1, 2, сплошные линии) и показателя по Мартенсу (3, 4, штриховые линии) от среднего размера зерен в сплавах АМГ2 (1, 3) и АМГ6 (2, 4)

С ростом размера зерен показатель по Мартенсу повышается в обоих сплавах, при этом меньшими значениями обладает сплав АМГ6, более легированный магнием. Показатель упругой отдачи в сплаве АМГ2 снижается с увеличением размера зерен, а в сплаве АМГ6 — возрастает.

Как показывают теоретические расчеты [22], величина упругой отдачи ($k_{пруж}$) зависит от толщины заготовок (s), положения нейтрального слоя (k), предела текучести (σ_T) и модуля Юнга (E) штампующих материалов:

$$k_{пруж} = 0,375 \frac{1}{ks} \frac{\sigma_T}{E}. \quad (1)$$

Согласно результатам проведенного исследования, изменения в формуле (1) касались только предела текучести — он уменьшался в обоих сплавах. Положение нейтрального слоя и толщина образцов были одинаковыми. Следовательно, снижение предела текучести должно приводить к уменьшению угла упругой отдачи. Такая тенденция наблюдалась для сплава АМГ2. Противоположное изменение упругой отдачи у сплава АМГ6 с увеличением размера зерна может быть связано с выделением дисперсных фаз, которые в сплавах системы Al—Mg отмечаются преимущественно по границам зерен. Это может способствовать росту остаточных напряжений, которые, как показано в исследовании [23], приводят к увеличению упругого пружинения. Как видно из рис. 1, в образцах сплава АМГ6 после отжига при $t = 250$ °С еще сохраняется частичная нагартовка, но размер зерна меньше, чем после отжига при $t = 350$ °С, упругое пружинение в сплаве АМГ6 при меньшем размере зерна выше. Это подтверждается также изменением модуля Юнга (E), который в сплаве АМГ6

сначала снижается, а затем повышается с ростом температуры отжига (см. таблицу), в то время как у сплава АМг2 происходит монотонное снижение величины E , что, согласно формуле (1), должно приводить к увеличению упругой отдачи, но противоречит полученным данным.

В результате испытаний на изгиб, выполненных для полунагартованного технического алюминия в исследовании [1], было установлено, что предел текучести при гибке изменяется по кривой с минимумом, который соответствует размеру зерна, равного толщине заготовки. То есть как укрупнение, так и измельчение зеренной структуры могут приводить к увеличению предела текучести при гибке, а соответственно, и росту величины упругой отдачи.

В работе [24] выявлено, что более высокие показатели упрочнения и чувствительности к деформации сплава АА5754 (аналога российского сплава АМг3 согласно ГОСТу 4794), которые можно получить за счет измельчения зерна, способствуют повышению штампуемости. Распределение дисперсных частиц оказывает незначительное влияние на первых этапах локализации деформации, а их влияние на однородность толщины плоских образцов становится существенным при появлении трещины. Вероятно, большее количество дисперсных фаз в сплаве АМг6 будет иметь большее влияние на штампуемость, в том числе и в гибочных операциях.

На рис. 4 показано изменение минимального радиуса гибки (r_{\min}) и числа текучести (n) сплавов АМг2 и АМг6 в зависимости от разности зеренности. Видно, что увеличение последней приводит к росту минимального радиуса гибки листовых образцов из сплава АМг2, но к снижению — в сплаве АМг6. Число текучести с повышением разности зеренности снижается у обоих сплавов, но в сплаве АМг6 заметно незначительное увеличение n и r_{\min} при разности зеренности $\sim 0,28$, которая появилась в результате отжига при $t = 250$ °С, т.е. при сохранении в структуре нерекристаллизованных зерен наряду с рекристаллизованными.

На рис. 5 представлены кривые изменения коэффициента упругого последствия ($k_{\text{пруж}}$) и коэффициента по Мартенсу (M) в зависимости от разности зеренности. С увеличением последней оба коэффициента в сплаве АМг6 повышаются незначительно, а в сплаве АМг2 коэффициент по Мартенсу возрастает в отличие от показателя упругой отдачи, который снижается. В сплаве АМг6 для

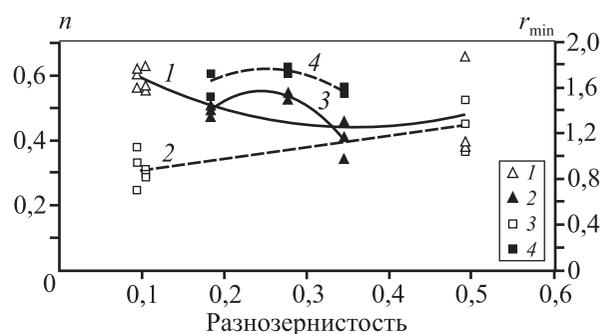


Рис. 4. Зависимости числа текучести (1, 3, сплошные линии) и минимального радиуса гибки (2, 4, штриховые) от разности зеренности в сплавах АМг2 (1, 3) и АМг6 (2, 4)

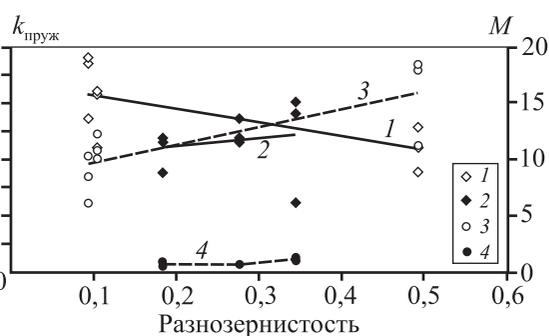


Рис. 5. Зависимости коэффициента упругой отдачи (1, 2, сплошные линии) и коэффициента по Мартенсу (3, 4, штриховые) от разности зеренности в сплавах АМг2 (1, 3) и АМг6 (2, 4)

разности зеренности, получившейся в результате отжига при относительно низкой температуре, наблюдаемые незначительные повышение показателя $k_{\text{пруж}}$ и уменьшение M свидетельствуют о пониженной штампуемости образцов в присутствии нерекристаллизованной структуры.

В исследовании влияния размера зерна на способность сплава А5052 (аналога российского сплава АМг2 по ГОСТу 4784) к формоизменению при листовой штамповке [24] показано, что истинные напряжения в сплаве при испытаниях на одноосное растяжение зависят, скорее, от сохранения нагартовки, чем от температуры нагрева или размера зерна. Так, в исходном нагартованном состоянии размер зерна составлял ~ 18 мкм, отжиг при $t = 500$ °С привел к его увеличению до 49 и 53 мкм при продолжительности 2 и 4 ч соответственно, а отжиг при $t = 600$ °С — к размерам 69 и 72 мкм при продолжительности 8 и 16 ч. При указанных режимах отжига также изменяется разность зеренности: если в исходном состоянии она составляла ~ 14 % от среднего размера зерна, то после отжига при $t = 500$ °С ее величина снижалась до 8—

9 %, а при $t = 600$ °С — возрастала до 12–16 %. При этом число текучести нагартованных образцов уменьшалось после отжига при $t = 500$ °С и размере зерна ~ 50 мкм и увеличивалось при $t = 600$ °С и $d_{cp} \sim 70$ мкм.

Из рассмотренных технологических свойств только повышение показателя по Мартенсу характеризует увеличение способности сплавов к деформируемости. Остальные характеристики (минимальный радиус гибки, число текучести, коэффициент упругого последействия) показывают наилучшую штампуемость при их минимальных значениях. Повышение коэффициента по Мартенсу, снижение минимального радиуса гибки и числа текучести в сплаве АМг6 с ростом размера зерен свидетельствуют о высокой пригодности сплава к операциям листовой штамповки. Но при этом будет наблюдаться сильное упругое последействие (или упругая отдача), что потребует увеличения угла изгиба при получении гнутых изделий, что является отрицательным показателем.

В сплаве АМг2 укрупнение зерен приводит к снижению числа текучести, уменьшению коэффициента упругого последействия и повышению коэффициента по Мартенсу. Но при этом наблюдается увеличение минимального радиуса гибки, однако его значения даже в крупнозернистой структуре оказываются меньше, чем у сплава АМг6.

В сплаве АМг6 при меньшем размере зерен отмечается довольно высокий показатель разнотекучести по сравнению с более крупнозернистой структурой сплава АМг2. Для сплава АМг2 его изменение влияет на все исследованные характеристики штампуемости, а для АМг6 — в основном на минимальный радиус гибки и число текучести (на упругой отдаче и показателе по Мартенсу изменение разнотекучести сказывается незначительно). Наблюдаемый большой разброс данных согласуется с результатами исследования [1].

Выводы

1. В результате холодной деформации сплавов АМг2 и АМг6 со степенью деформации 20 % и последующего отжига при температурах 250, 350 и 450 °С в течение 1 ч сплав АМг2 сохранил более крупное зерно по сравнению со сплавом АМг6.

2. Увеличение размера зерен приводит к повышению показателя по Мартенсу и снижению числа текучести обоих сплавов, что положительно влияет на их способность к вытяжным операциям

листовой штамповки. С ростом размера зерен в сплаве АМг6 минимальный радиус гибки уменьшается, а упругое последействие повышается, а в сплаве АМг2 — наоборот, минимальный радиус гибки увеличивается, а упругое последействие снижается.

3. Разнотекучесть в сплаве АМг2 обуславливает уменьшение числа текучести и показателя упругой отдачи, но увеличение показателя по Мартенсу и минимального радиуса гибки.

4. Установлено, что в сплаве АМг6 при неполном протекании рекристаллизации наблюдается снижение штампуемости.

5. Несмотря на изменение радиуса гибки в зависимости от размера зерна в обоих сплавах, сплав АМг6 имеет более высокие показатели минимального радиуса гибки, что показывает меньшую его пригодность к гибочным операциям.

Литература/References

1. Raulea L.V., Goijaerts A.M., Govaert L.E., Baaijens F.P.T. Size effect in the processing of thin metal sheet. *J. Mater. Process. Technol.* 2001. Vol. 115 (1). P. 44–48.
2. Janssen P.J.M., de Keijser Th.H., Geers M.G.D. An experimental assessment of grain size effects in the uniaxial straining of thin Al sheet with a few grains across the thickness. *Mater. Sci. Eng. A.* 2006. Vol. 419. P. 238–248.
3. Gau J., Principe C., Wang J. An experimental study on size effects on flow stress and formability of aluminium and brass for microforming. *J. Mater. Process. Technol.* 2007. Vol. 184. P. 42–46.
4. Vollertsen F., Biermann D., Hansen H.N., Jawahir I.S., Kuzman K. Size effects in manufacturing of metallic components. *CIRP Annu. Manuf. Technol.* 2009. Vol. 58 (2). P. 566–587.
5. Зиновьева О.С., Романова В.А. Численное исследование влияния размера зерна и условий нагружения на деформационные характеристики поликристаллического алюминиевого сплава. *Соврем. пробл. науки и образования.* 2013. No. 6. URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=11299> (дата обращения: 21.03.2019).
Zinov'eva O.S., Romanova V.A. Numerical research of grain size and load condition effect on deformation characteristics of polycrystalline aluminum alloy. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya.* 2013. No. 6. URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=11299> (accessed: 21.03.2019) (In Russ).
6. Pereira M.P., Yan W., Rolfec B.F. Sliding distance, contact

- pressure and wear in sheet metal stamping. *Wear*. 2010. Vol. 268. P. 1275—1284.
7. Babu S.S.M., Berry S., Ward M., Krzyzanowski M. Numerical investigation of key stamping process parameters influencing tool life and wear. *Proc. Manuf.* 2018. Vol. 15. P. 427—435.
 8. Китаева Д.А., Коджаспиров Г.Е., Рудаев Я.И. О самоорганизации в процессах термомеханического деформирования. *Вестн. Тамбовского ун-та. Сер. Естеств. и техн. науки. Физика*. 2016. Т. 21. Вып. 3. С. 1051—1054. Китаева Д.А., Коджаспиров Г.Е., Рудаев Я.И. On self-organization in process of thermomechanical deformation. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Ser. Estestvennye i tekhnicheskie nauki. Fizika*. 2016. Vol. 21. Iss. 3. P. 1051—1054 (In Russ.).
 9. Китаева Д.А., Рудаев Я.И. О макрокинетики динамической сверхпластичности алюминиевых сплавов. *Матем. моделирование систем и процессов*. 2005. No. 13. С. 115—122. Китаева Д.А., Рудаев Я.И. On macrokinetics of dynamic superplasticity in aluminium alloys. *Matematicheskoe modelirovanie sistem i protsessov*. 2005. No. 13. P. 115—122 (In Russ.).
 10. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов: Учебник. 4-е изд., испр. и доп. М.: Металлургия, 1986. Novikov I.I. Theory of heat treatment. Moscow: Metallurgiya, 1986 (In Russ.).
 11. Ben Hmida R., Thibaud S., Gilbin A., Richard F. Influence of the initial grain size in single point incremental forming process for thin sheets metal and microparts: Experimental investigations. *Mat. Des.* 2013. Vol. 45. P. 155—165.
 12. Toros S., Ozturk F. Modeling uniaxial, temperature and strain rate dependent behavior of Al—Mg alloys. *Comput. Mat. Sci.* 2010. Vol. 49. No. 2. P. 333—339.
 13. Singh M., Choubey A.K., Sasikumar C. Formability analysis of aluminium alloy by erichsen cupping test method. *Mater. Today. Proc.* 2017. Vol. 4. Iss. 2. Pt. A. P. 805—810.
 14. Кишкина С.И., Фридляндер И.Н. Авиационные материалы. Т. 4. Алюминиевые и бериллиевые сплавы. Ч. I. Деформируемые алюминиевые сплавы и сплавы на основе бериллия. Кн. 1. Под ред. Р.Е. Шалина. Справочник в 9 т. 6-е изд., перераб. и доп. М.: ОНТИ, 1982. Kishkina S.I., Fridlyander I.N. Aviation materials. Vol. 4. Aluminum and beryllium alloys. Part 1. Work aluminium alloys and alloys based on beryllium. Book 1. Ed. R.E. Shalin. Moscow: ONTI, 1982 (In Russ.).
 15. Liu Y., Wang L., Zhu B., Zhang Y. Identification of two aluminium alloys and springback behaviours in cold bending. *Procedia Manuf.* 2018. Vol. 15. P. 701—708.
 16. Yuan W., Wan M., Wu X. Prediction of forming limit curves for 2021 aluminum alloy. *Proc. Eng.* 2017. Vol. 207. P. 544—549.
 17. Hua X., Wilkinson D.S., Jain M., Wu P., Mishra R.K. Fuel cap stamping simulation of AA5754 sheets using a microstructure based macro-micro multi-scale approach. *Comput. Mater. Sci.* 2015. Vol. 98. P. 354—365.
 18. Мальцев М.В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов (с атласом макро- и микроструктур). 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1970. Mal'tsev M.V. Metallography of commerce non-ferrous metals and alloys. Moscow: Metallurgiya, 1970 (In Russ.).
 19. Рогельберг И.Л., Шпичинецкий Е.С. Диаграммы рекристаллизации металлов и сплавов: Справочник. М.: Металлургиздат, 1950. Rogel'berg I.L., Shpichinetskiy E.S. Recrystallization diagram of metals and alloys. Moscow: Metallurgizdat, 1950 (In Russ.).
 20. Панченко Е.В., Скаков Ю.А., Кример Б.И. Лаборатория металлографии: Учеб. пос. 2-е изд., испр. и доп. М.: Металлургия, 1965. Panchenko E.V., Skakov U.A., Krimer B.I. Laboratory of metallography. Moscow: Metallurgiya, 1965 (In Russ.).
 21. Zhang J.X., Ma M., Liu W.C. Effect of initial grain size on the recrystallization and recrystallization texture of cold-rolled AA 5182 aluminum alloy. *Mater. Sci. Eng. A*. 2017. Vol. 690. P. 233—243.
 22. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. 5-е изд., доп. и перераб. Л.: Машиностроение, 1971. Romanovskii V.P. Handbook on cold stamping. Leningrad: Mashinostroenie, 1971 (In Russ.).
 23. Grèze R., Manach P.Y., Laurent H., Thuillier S., Menezes L.F. Influence of the temperature on residual stresses and springback effect in an aluminium alloy International. *J. Mech. Sci.* 2010. Vol. 52. P. 1094—1100.
 24. Cheng T. Ch., Lee R. Sh. The influence of grain size and strain rate effects on formability of aluminium alloy sheet at high-speed forming. *J. Mater. Process. Technol.* 2018. Vol. 253. P. 134—159.