

PASC: 81.40.№р

Е.Н. Высоцкий

ДЕФОРМАЦИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ ЛИТЕЙНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

НПП «Станко Маш»

ул. Р. Люксембург, 72, г. Донецк, 83114, Украина

E-mail: stankomash2004@ukr.net

Статья поступила в редакцию 22 марта 2007 года

Исследованы литейные алюминиевые сплавы, отличающиеся повышенной хрупкостью. Показано, что деформация гидропрессованием в сочетании с термообработкой повышает их прочностные и пластические характеристики.

Введение

Технические алюминиевые сплавы подразделяются на две группы: применяемые в деформированном виде (прессованном, катаном, кованом) и в литом. Литейные сплавы не должны содержать много эвтектики, которая ухудшает механические и некоторые технологические свойства. Все они могут упрочняться в результате термической обработки, однако степень упрочнения при этом незначительна [1,2].

Для обеспечения долговечности и надежности насосов высокого давления к их деталям и гидромоторам, изготовленным из литейных алюминиевых сплавов, предъявляются требования повышенной прочности и пластичности. В условиях серийного производства корпуса, отлитые в кокиль из этих сплавов, подвергаются термообработке, которая практически не повышает их эксплуатационные характеристики. Легирующие элементы, упрочняющие алюминий с образованием твердых растворов и хрупких выделений, понижают способность к деформированию при обработке давлением.

Как известно, гидропрессование в определенном сочетании с термообработкой повышает прочностные и пластические характеристики материала. Благоприятная схема напряженно-деформированного состояния, реализуемая при гидропрессовании, позволяет не только деформировать такие малопластичные материалы, как литейные алюминиевые сплавы, но и повышать их эксплуатационные свойства [3].

Целью данной работы было изучение влияния холодного гидропрессования на прочностные и пластические характеристики литейных алюминиевых сплавов.

Методика эксперимента

Для изготовления корпусных деталей насосов и гидромоторов высокого давления применяются литейные алюминиевые сплавы АЛ9, АК7МЗЦ2Мг и АМО7-3.

В условиях серийного производства корпуса, отлитые в кокиль из сплава АЛ9, подвергают термообработке: закалке при температуре 535°C с выдержкой в течение 4 h, охлаждением в воде при температуре 60–80°C и последующим старением при 150°C, 2 h. В результате такой обработки сплав имеет предел прочности на разрыв $\sigma_b = 210$ МПа, относительное удлинение $\delta = 2\%$, твердость 60 НВ.

Сплав АК7МЗЦ2Мг также отливают в кокиль и термообрабатывают – отжигают при 170°C в течение 7 h. При этом $\sigma_b = 200$ МПа, $\delta \geq 0.5\%$, твердость 90–110 НВ.

Из алюминиевого антифрикционного сплава АМО-7-3 изготавливают подшипники скольжения шестеренчатых насосов. Сплав, отлитый в кокиль, имеет невысокую твердость 75–115 НВ, временное сопротивление разрыву $\sigma_b = 170$ МПа.

Гидропрессование образцов проводили на прессе усилием 100 tf в контейнере с диаметром рабочей камеры 21 mm через матрицу диаметром 12.5 mm со степенями деформации от 10 до 60% (через каждые 10%). Перед гидропрессованием образцы фосфатировали в следующем растворе: ортофосфорная кислота – 330 ml/l, фтористый натрий – 3 g/l, двуххромовокислый калий (хромпик) – 34 g/l, рабочая температура – 55°C, время выдержки – 35 min. После фосфатирования заготовки погружали на 5–10 s в 0.1%-ный раствор хромового ангидрида при температуре 18–20°C, высушивали теплым воздухом до образования фосфатной пленки-покрытия коричневого цвета толщиной 20–30 μm . В качестве смазки применяли раствор: MoS_2 – 25 g, клей БФ2 – 75 g, ацетон – 0.5 l. Для сравнения эффективности покрытий и смазок на алюминиевых сплавах гидропрессование со степенью деформации 50% осуществляли без фосфата и смазки. Давление в контейнере при этом не колебалось, задиры и налипания не наблюдались, процесс гидропрессования был устойчив и составлял 0.54 МПа, как и в случае для гидропрессования заготовок с фосфатом и покрытиями. Давление в контейнере повышали монотонно от 0.18 до 0.63 МПа и определяли по формуле $P = \frac{P_{\text{man}} d_{\text{cyl}}^2}{d_{\text{cont}}^2}$, где

P_{man} – показания манометра, МПа; d_{cyl} , d_{cont} – диаметры соответственно цилиндра пресса и контейнера, см.

С целью изучения влияния гидропрессования на свойства сплава АЛ9 было предложено три варианта технологических приемов обработки образцов:

- I – литое состояние + деформация + закалка,
- II – литое состояние + деформация + закалка + старение,
- III – литое состояние + закалка + деформация + старение.

Для определения влияния режимов гидропрессования в различном сочетании с термообработкой на свойства сплавов проводили испытания образцов на растяжение по стандартным методикам. Изготавливали круглые пропорциональные короткие образцы диаметром $d_0 = 6$ mm и с расчетной длиной $5d_0$.

Кроме того, исследовали микроструктуру на металлографическом микроскопе и определяли изменение твердости на твердомере по Бринеллю (диаметр шарика 10 mm, нагрузка 1 tf).

Влияние гидропрессования на структуру и свойства алюминиевых сплавов

Сплав АЛ9 (силумин) относится к числу доэвтектических алюминиевых сплавов. Структура его представляет собой первичные кристаллы α и эвтектику ($\alpha + \text{Si}$). Кремний имеет переменную растворимость в алюминии, которая возрастает от 0.1% при комнатной температуре до 1.65% при эвтектической (577°C). Нагревом сплава до температуры, близкой к эвтектической, и быстрым охлаждением можно получить пересыщенный твердый раствор кремния в алюминии, который при последующем старении распадается с выделением дисперсных частиц кремния, имеющих вид иголок, пластин или сфероидов. При этом упрочняющий эффект незначителен [4]. Таким образом, двойные силумины относятся к числу термически неупрочняемых, обладающих невысокими прочностными характеристиками.

Закалка образцов из АЛ9 при температуре $535 \pm 10^\circ\text{C}$ и времени выдержки 4 h с охлаждением в воде при температуре $60\text{--}80^\circ\text{C}$ имеет твердость 70.6 НВ. Старение при температуре $150 \pm 10^\circ\text{C}$ с выдержкой 2 h и охлаждение на воздухе повышают твердость до 78.3 НВ, а твердость литого состояния составляет 60.9 НВ.

Таким образом, твердость термообработанного силумина как при закалке, так и при старении повышается незначительно, поэтому на практике этот сплав часто только закалывают.

Взросшие эксплуатационные параметры деталей гидросистем требуют повышения прочности алюминиевых сплавов. Поэтому гидропрессование алюминиевых сплавов типа силуминов может оказаться эффективным методом повышения прочностных характеристик, обеспечивающих измельчение структурных хрупких составляющих [5].

Результаты испытания образцов на растяжение из АЛ9 приведены на рис. 1. Как видно, изменение прочностных и пластических характеристик происходит по-разному. Для I и II вариантов обработки эти изменения аналогичны, только старение несколько увеличивает прочностные характеристики с одновременным уменьшением пластичности. Однако с повышением степени деформации образцов при этих вариантах обработки увеличиваются как прочность, так и пластичность. Прочность возрастает в 1.6 раза, пластичность – почти в 5–6 раз. Технологический III вариант повышает прочность

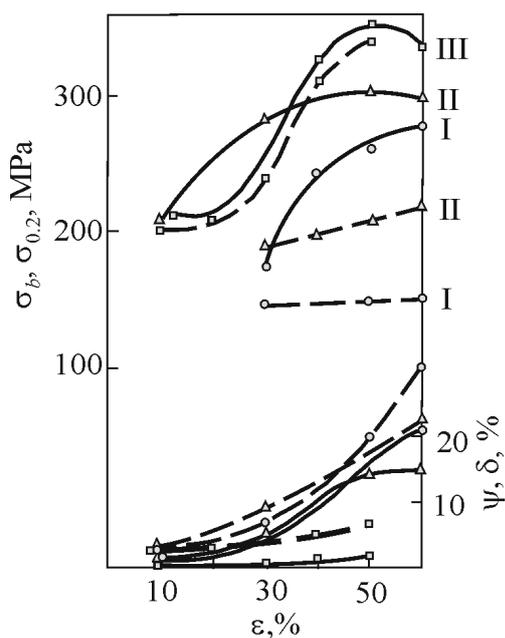


Рис. 1. Зависимости прочностных характеристик σ_b (сплошные кривые) и $\sigma_{0,2}$ (штриховые), а также пластических δ (сплошные) и ψ (штриховые) алюминиевого сплава АЛ9 от степени деформации ε и от варианта обработки: \circ – I вариант, Δ – II, \square – III

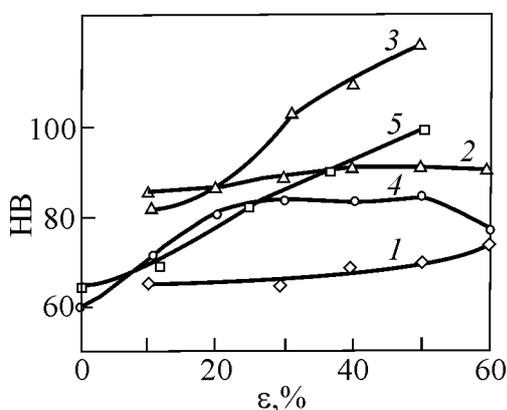


Рис. 2. Зависимости твердости от степени деформации для алюминиевых сплавов: 1, 2, 3 – АЛ9, обработанный по технологическим вариантам соответственно I, II, III; 4 – АК7МЗЦ2Мг; 5 – АМО-7-3

АЛ9 почти в 2 раза, а пластичность практически не увеличивает по сравнению с I и II вариантами. Изменение твердости для всех вариантов аналогично изменению условного предела текучести (рис. 2).

Изменение прочностных и пластических характеристик существенно взаимосвязано с изменением структурного состояния материала (рис. 3). Изучение структуры силумина показало, что в литом состоянии наблюдается наличие твердого раствора α и эвтектики ($\alpha + Si$) темного цвета, образующей каркас в виде пластин и иголок. После термообработки каркас разбивается, меняя свою форму и распределение частиц кремния. Частицы кремния в основном округлой формы распределяются по границам зерен, наблюдаются также частицы в виде иголок и пластин. Деформация вносит существенный вклад в структурные изменения силумина АЛ9. Частицы чистого кремния в виде как сферических, так и иглоподобных выделений измельчаются и равномерно-прерывистой цепочкой выделяются по границам измельченных зерен. По всей видимости, выделение этих дисперсных твердых включений кремния предопределяет повышение прочностных и пластических характеристик сплава.

Гидропрессование сплава АМО-7-3 аналогично, как и предыдущего сплава, позволило повысить прочностные и пластические свойства. Перед гидропрессованием образцы из АМО-7-3 гомогенизировали при температуре 450–470°C в течение 8 h. Гидропрессование проводили по обычной тех-

нологии со степенью деформации 30–40%, но скорость истечения металла при этом контролировали в пределах 4–6 mm/s, что позволило повысить прочность в 1.5 и пластичность в 2–3 раза.

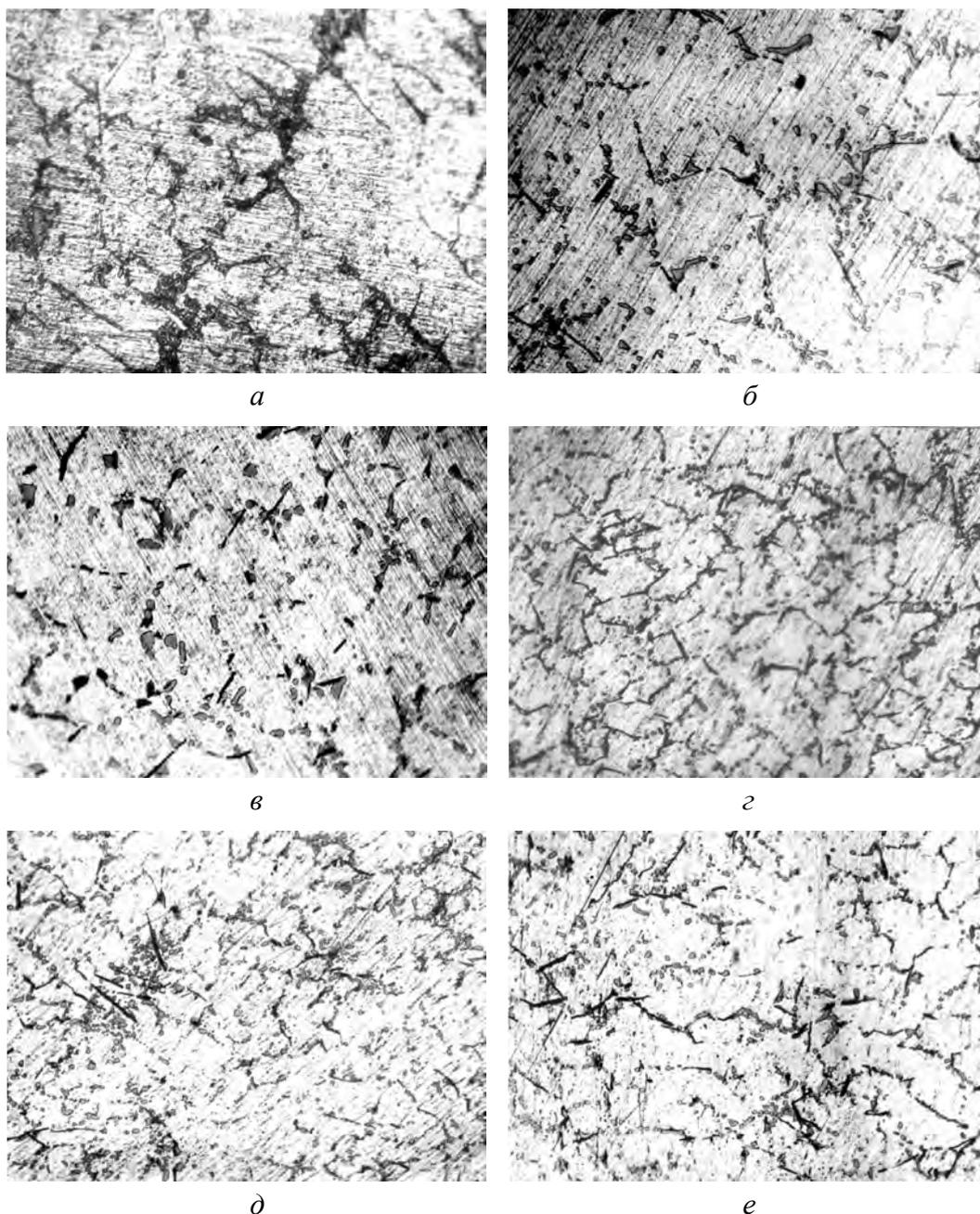


Рис. 3. Микроструктура алюминиевого сплава АЛ9 при различных вариантах термообработки и деформации ($\times 200$): *a* – литое состояние, *б* – литое состояние + закалка, *в* – литое состояние + закалка + старение, *г* – литое состояние + деформация 50% + закалка, *д* – литое состояние + деформация 50% + закалка + старение, *е* – литое состояние + закалка + деформация 50% + старение

Для изготовления корпусных деталей шестеренчатых насосов гидромоторов применяется также специальный сплав повышенной прочности АК7М3Ц2Мг. Элементы Cu, Zn, Si, Mg, упрочняющие алюминий за счет образования твердых растворов и мелких выделений, понижают его способность деформироваться при обработке давлением [4]. Поэтому при гидро-

прессовании данного сплава, отличающегося повышенной хрупкостью, практически невозможно было получить качественные прессовки – они не только растрескивались, но и просто рассыпались. В связи с этим предварительно перед гидропрессованием проводили стабилизирующий отжиг при температуре 170°C в течение 7 h с охлаждением на воздухе. Однако это не улучшило способность сплава к деформированию, и при гидропрессовании отожженные образцы также рассыпались.

Как известно, способность таких сплавов к формоизменению улучшается с ростом температуры отжига и достигает максимума в интервале 370–455°C. С учетом этого обстоятельства был применен гомогенизирующий отжиг для сплава АК7М3Ц2Мг при температуре $400 \pm 20^\circ\text{C}$ с различной выдержкой (3 и 5 h). Твердость исходного материала составляла 81 НВ, а после отжига понижалась до 61 НВ при выдержке как в течение 3 h, так и 5 h. Поэтому предварительно проводили гомогенизирующий отжиг при температуре 400°C в течение 3 h. Перед гидропрессованием образцы покрывали смазкой MoS_2 и омыливали, процесс гидропрессования шел стабильно, образцы получались качественными без трещин и расслоений. После гидропрессования образцы подвергали стабилизирующему отжигу при температуре

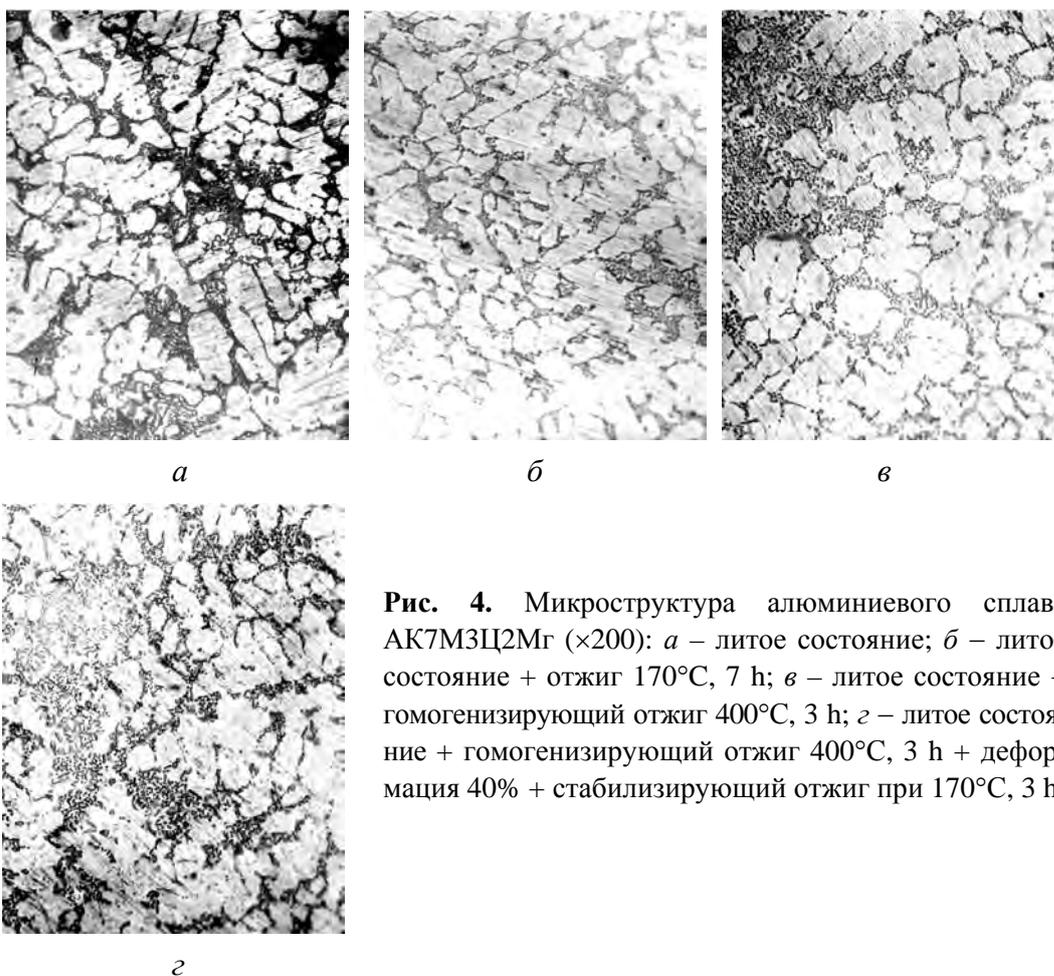


Рис. 4. Микроструктура алюминиевого сплава АК7М3Ц2Мг ($\times 200$): *а* – литое состояние; *б* – литое состояние + отжиг 170°C, 7 h; *в* – литое состояние + гомогенизирующий отжиг 400°C, 3 h; *г* – литое состояние + гомогенизирующий отжиг 400°C, 3 h + деформация 40% + стабилизирующий отжиг при 170°C, 3 h

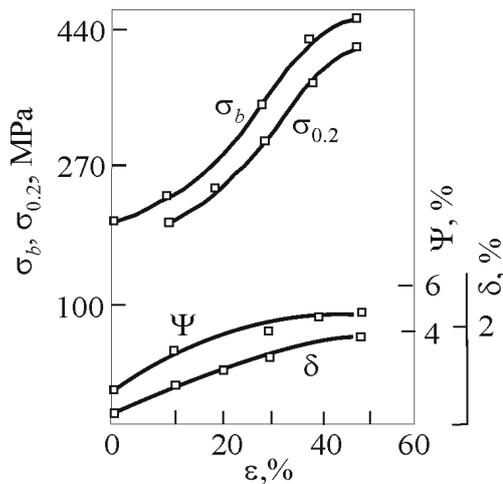


Рис. 5. Зависимости прочностных и пластических характеристик сплава АК7М3Ц2Мг от степени деформации

цам дендритов имеется каркас хрупкой фазы сложного состава, к примеру Mg_2Si , Al_2CuMg , $Al_2Mg_3Zn_3$ и др.

Стабилизирующий отжиг уменьшает в некоторой степени внутридендритную ликвацию, хрупкие фазы растворяются, увеличивая концентрацию твердого раствора. Гомогенизация сплава при $400^\circ C$ увеличивает однородность материала, дендриты приобретают округлую форму, происходит перераспределение хрупких фаз, по границам дендритов выделяются еще небольшие светлые включения, по всей вероятности, содержащие кремний. Существенное влияние на структуру оказывает деформация. Так, при деформации 40% дендриты измельчаются, приобретают более круглую форму. Участки хрупкой фазы уменьшаются и равномерно обволакивают измельченные дендриты.

Результаты прочностных испытаний сплава АК7М3Ц2Мг после гидропрессования при различных степенях деформации приведены на рис. 5. С повышением степени деформации прочность сплава монотонно повышается и при $\epsilon = 50\%$ увеличивается вдвое. С ростом степени деформации повышаются также и пластические характеристики материала в 3–4 раза. Однако даже при таком повышении прочностных и пластических характеристик этот сплав остается довольно хрупким и с трудом может конкурировать с алюминиевым сплавом АЛ9, который обладает более высокой пластичностью при равнозначной прочности.

Оценка динамической прочности при циклическом нагружении упрочненных алюминиевых сплавов

Особое значение для исследуемых алюминиевых сплавов имеет динамическая прочность, т.е. способность материала быть устойчивым к образованию трещин при циклических нагружениях. Обычно для конструкций желаемого

$170 \pm 20^\circ C$ в течение 3 h. Исследования изменения твердости показали, что с повышением степени деформации наблюдается упрочнение алюминиевого сплава до деформации 50% (см. рис. 2). При степени деформации 60% заметно разупрочнение, что, по всей видимости, связано с рекристаллизацией этого материала.

Изучение структуры сплава АК7М3Ц2Мг проводили на всех технологических стадиях. Структура исходного литого материала (рис. 4) представляет собой первичные дендриты твердого раствора, неоднородные по составу и размерам. По границам дендритов имеется каркас хрупкой фазы сложного состава, к примеру

тельные материалы, которые способны упрочняться в процессе циклического деформирования. Склонность металлических материалов при этом к упрочнению или разупрочнению определяется отношением временного сопротивления к условному пределу текучести ($\sigma_b/\sigma_{0.2}$). По литературным данным [6], все материалы с $\sigma_b/\sigma_{0.2} < 1.2$ при циклическом деформировании разупрочняются, а материалы с $\sigma_b/\sigma_{0.2} > 1.4$ – упрочняются.

При $1.2 < \sigma_b/\sigma_{0.2} < 1.4$ может происходить либо упрочнение, либо разупрочнение. Пользуясь этим положением, можно сказать, что в процессе циклического нагружения упрочненные сплавы АК7МЗЦ2Мг и АЛ9, обработанный по технологии III варианта, будут разупрочняться, а сплав АЛ9, обработанный по технологии I и II вариантов, будет упрочняться (таблица).

Таблица

**Характеристики упрочнения и разупрочнения
в процессе циклического нагружения цветных алюминиевых сплавов**

Сплав	Вариант обработки	σ_b , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	$\sigma_b/\sigma_{0.2}$
АЛ9	I	276	140	1.97
	II	306	203	1.5
	III	349	336	1.04
АК7МЗЦ2Мг		312	287	1.08

Анализируя приведенные расчеты, можно утверждать, что сплав АЛ9, обработанный по II варианту, наиболее полно отвечает требованиям, предъявляемым к корпусным деталям, работающим при циклических нагружениях.

Выводы

1. Литейные алюминиевые сплавы могут успешно подвергаться гидропрессованию со степенью деформации до 50% благодаря схеме напряженно-деформированного состояния.
2. Деформация гидропрессованием позволяет существенно изменять структурное состояние исследуемых сплавов, повышать их прочность в 1.7–2 раза и пластичность в 3–5 раз.
3. Деформация гидропрессованием в сочетании с термообработкой повышает динамическую прочность сплава АЛ9 при циклическом нагружении.

1. *Алюминиевые сплавы*, М.Е. Дриц, Л.Х. Райтбарг (ред.), Мир, Москва (1979).
2. *А.П. Смирягин, Н.А. Смирягина, А.П. Белов*, Промышленные цветные металлы и сплавы. Справочник, Мир, Москва (1974).
3. *В.П. Саакьянц, Е.Н. Высоцкий, А.С. Горбунов, А.В. Чернышов, В.С. Ковико*, Всесоюз. научн.-техн. конф. исполнителей программы «Металл», Абакан, 26–30 сент. 1988 г.

4. *Б.А. Колачев, В.А. Ливанов, В.И. Елагин*, Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов, Металлургия, Москва (1972).
5. *В.С. Ковико, Е.Н. Высоцкий, В.П. Саакьянц*, XIV научн. семинар «Влияние высоких давлений на вещество», Киев, 1991 г.
6. *В.М. Горицкий, В.Ф. Тереньев*, Структура и усталостное разрушение металлов, Металлургия, Москва (1980).

E.N. Vysotsky

STRAIN HARDENING OF CASTING ALUMINIUM ALLOYS

Casting aluminium alloys of different promoted fragility have been investigated. It is shown that deformation by hydropressing combined with heat treatment improves their strength and plasticity characteristics.

Fig. 1. Dependences of strength σ_b (solid curves) and $\sigma_{0.2}$ (dashed) as well as of plastic δ (solid) and ψ (dashed) characteristics of aluminium alloy АЛ9 on deformation ratio ε and on treatment variant: \circ – I variant, Δ – II, \square – III

Fig. 2. Dependences of hardness on deformation ratio for aluminium alloys: 1, 2, 3 – АЛ9 treated by technological variants I, II, III, respectively; 4 – АК7М3Ц2Мг; 5 – АМО-7-3

Fig. 3. Microstructure of aluminium alloy АЛ9 at different variants of heat treatment and deformation ($\times 200$): *a* – cast state, *b* – cast state + quenching, *в* – cast state + quenching + ageing, *г* – cast state + 50% deformation + quenching, *д* – cast state + 50% deformation + ageing, *е* – cast state + quenching + 50% deformation + ageing

Fig. 4. Microstructure of aluminium alloy АК7М3Ц2Мг ($\times 200$): *a* – cast state; *b* – cast state + 170°C annealing, 7 h; *в* – cast state + 400°C homogenization annealing, 3 h + 40% deformation + 170°C stabilization annealing, 3 h

Fig. 5. Dependences of strength and plasticity characteristics of alloy АК7М3Ц2Мг on deformation ratio