

УДК 621.73;621.315

Феноменология критериев качества материала поковок из сплавов группы АМг

П.А. Головкин

АО «Плутон»

Phenomenology of quality criteria material forgings from aluminum-magnesium alloys AMg group

P.A. Golovkin

Pluton JSC

С позиций технологической наследственности рассмотрена феноменология оценки качества материала поковок из алюминиевых сплавов группы АМг в части зависимости их герметичности и коррозионной стойкости от параметров термической обработки слитка и преобладающих механизмов его пластической деформации. Основываясь на металлургических особенностях сплавов и используя феноменологический подход в виде графиков и аппроксимирующих формул определены численные зависимости экспериментально установленных показателей твердости, разрыхления материала поковок и объемного содержания в нем избыточных фаз от накопленной материалом деформации и ее режимов. Численные данные для расчетов получены путем математического моделирования процессов горячей пластической деформации с использованием отечественного программного продукта QForm. Обоснована совместная оценка разрыхления и объемного содержания избыточных фаз в виде комплексного показателя качества материала поковок из алюминиевых сплавов группы АМг, а также технологические решения для получения их величины, не превышающей заданную.

EDN: WТАКТG, <https://elibrary/wtactg>**Ключевые слова:** поковки, алюминиевый сплав, критерий качества материала, разрыхление материала, избыточные фазы, деформация сдвига

From the standpoint of technological heredity, the phenomenology of assessing the quality of the forging material from aluminum alloys of the AMg group in terms of the dependence of their tightness and corrosion resistance on the parameters of the thermal treatment of the ingot and on the prevailing mechanisms of its plastic deformation is considered. Based on the metallic features of alloys, and using a phenomenological approach, in the form of graphs and approximating formulas, the numerical dependencies of experimentally established hardness indicators, loosening of the forging material, and the volume content of excess phases in it, on the amount of deformation accumulated by the material, on its modes are determined. Numerical data for calculations were obtained by mathematical modeling of hot plastic deformation processes using the software product Q-Form. Joint assessment of loosening and volumetric content of excess phases is substantiated in the form of complex quality index of forging material from aluminium alloys of AMg group, and technological solutions are numerically substantiated to obtain their value not exceeding the specified value.

EDN: WТАКТG, <https://elibrary/wtactg>**Keywords:** forgings, aluminum alloy, quality criteria material, material loosening, excess phases, shear deformation

Практика изготовления герметичных деталей из алюминиево-магниевого сплава показала опасность возникновения в материале горячекатаных плит, кованных и штампованных поковок таких дефектов, как строчечные включения избыточных фаз, поры и расслоения [1, 2]. Эти повреждения материала могут быть опасны для особо ответственных изделий, как их определяет ГОСТ Р 57945–2017 [3], что требует проверки качества деталей и их заготовок на соответствие требованиям ОСТ 92-1008–77 [4] и ОСТ 92-1019–81 [5], и дополнительно, в части герметичности, ОСТ 92-4316–90 [6].

Однако даже такая проверка не может дать гарантии качества поковок группы контроля 1а и 1 по классификации ОСТ 92-1008–77 и ОСТ 92-1019–81 ввиду недостаточного учета деформационного разогрева материала, который может вызвать неприемлемое падение его качества, как это описано в статьях [7, 8]. Содержание избыточных фаз существенно влияет на сопротивляемость коррозионным повреждениям [9] и герметичность [10] материалов из алюминиевых сплавов, что критически важно, например, для работы герметизируемых микросборок [10–12].

Для удобства описания объемную долю избыточных фаз в виде Mg_2Al_3 , Mg_5Al_8 и других соединений [13–15], часто описываемых не совпадающими формулами [16, 17], по аналогии с работой [18], обозначим как виде показателя V_v .

В то время как температура плавления алюминия составляет 660 °С [19], основные в сплавах системы Al-Mg интерметаллические соеди-

нения Mg_2Al_3 и Mg_5Al_8 , обозначаемые также как β и β' , конгруэнтно плавятся при 450 и 452 °С соответственно [13], и на уровне ближнего порядка сохраняют устойчивость вплоть до перегрева расплава на 130 °С относительно температуры ликвидуса [14, 15]. Это означает, что растворение β и β' фаз в материале при отжиге заготовок по режимам ОСТ 92-1019–81, не может быть полным, так как установленные этим документом температуры и время выдержки заготовок много ниже прописанных в ТР 50-31–70 для гомогенизации алюминиево-магневых слитков [20].

Согласно работе В.В. Захарова, для растворения в слитках из сплавов АМг3, АМг5 и АМг6 с химическим составом по ГОСТ 4784–2019 [21] переходящих из расплава избыточных фаз необходима выдержка при температуре не менее 500 °С [22], которая и рекомендована ТР 50-31–70 для их гомогенизации. Так как эта температура существенно превышает значения, установленные ОСТ 92-1619–87 [23] и ПИ 1.2.085–78 [24] для деформации и термической обработки, металлический материал оказывается насыщен избыточными фазами и диффузионными пустотами [1, 2].

Следует указать на работы К.А. Осипова, где он проводит аналогии между плавлением, перемещением и разрушением металлического материала в разогреваемых деформацией плоскостях скольжения [25]. Несмотря на то, что такая точка зрения подверглась критике В.С. Ивановой и В.Ф. Терентьевым [26], она хорошо объясняет образование и дальнейшее растворение избыточных фаз.

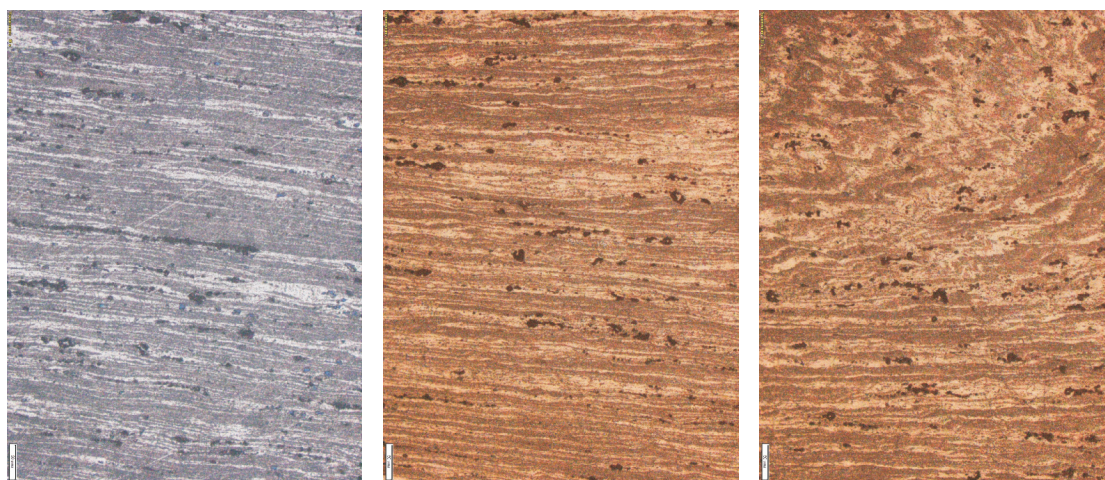


Рис. 1. Микроструктура цепочки избыточных включений и микропустот, образующих микрорасслоения в материале поковки из сплава АМг6 при увеличении $\times 200$

Также В.Л. Колмогоров [27], Ю.Н. Курсиков и А.И. Мурзов [28] указали на связь распределения пористости, растягивающих напряжений и полей температур в отоженных алюминиевых слитках и поковках, а Л.Ф. Мондольфо [13] и М.Е. Дриц [29] отметили, что при горячей деформации скопления избыточных фаз ослабляют и охрупчивают металлический материал.

Кроме того, известно [16], что β -фаза Mg_2Al_3 имеет коэффициент диффузии в алюминии $D_\beta = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$, в то время как δ -фаза Mg_3Al_2 перемещается не быстрее $D_\delta = 2,1 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2/\text{с}$, т. е., медленнее примерно в 10 раз. Именно неполное и неравномерное растворение избыточных фаз приводит к образованию структуры, где они перемежаются с микропустотами, как это показано на рис. 1.

Все это дает основание для принятия такого важного приближения, как суммарная оценка разрыхления материала и количества в нем избыточных фаз, и связать между собой параметры деформации материала с происходящими в нем физико-химическими процессами [30].

Избыточные фазы как показатель поврежденности материала. Известно, что процесс накопления материалом поврежденности при его деформации происходит ступенчато. Так, А.А. Богатов указывает, что при монотонном растяжении образца не залечиваемые отжигом дефекты образуются уже при 0,3...0,4 значения разрушающей деформации [31], и разрушение независимо от гидростатического давления наступает при достижении занятой порами площади, составляющей около 20 % площади шейки образца [31]. То же касательно порообразования при ползучести сталей описано в работе [32]. Для осадки критичное значение деформации составляет 0,6...0,8 предельного показателя [31].

Феноменологический и критериальный подходы к исследованиям позволяют вычленять условно более или менее важные показатели и, принимая обоснованные допущения, рассматривать одни показатели в функцию других, исключая третьи [33]. Описывая феноменологическую теорию разрушения, В.Л. Колмогоров [34, 35] связывает разрыхление материала с его деформацией выражением

$$d\xi = \alpha d\Lambda, \quad (1)$$

где $d\xi$ — приращение пластического разрыхления; α — показатель интенсивности пласти-

ческого разрыхления материала; $d\Lambda$ — приращение деформации сдвига за малый промежуток времени $d\tau$.

Показатель α зависит не только от вида материала, его напряженного состояния, температуры и скорости деформации, но и от характера ее протекания [34], т. е. от преобладающего механизма [36].

Показатель α можно связать с показателем поврежденности материала, используя критерий микроразрушения В.Л. Колмогорова [27, 37], определяемый выражением [31]

$$\Psi = \frac{\Lambda_{кр}}{\Lambda_{пр}}, \quad (2)$$

где $\Lambda_{кр}$ — критическая степень деформации сдвига; $\Lambda_{пр}$ — предельная пластичность материала.

Для процесса осадки деформацию сдвига вычисляют по формуле [38]

$$\Lambda_{ос} = \sqrt{3} \ln \frac{h_0}{h_1}, \quad (3)$$

где h_0 и h_1 — высота образца до осадки и в момент его разрушения вследствие осадки.

Тогда, исходя из данных А.А. Богатова [31], предельное значение критерия микроразрушения материала

$$\Psi_{кр} \leq 0,6 \dots 0,8 \Lambda_{пр}. \quad (4)$$

Если принять приближение о совместной оценке количества избыточных фаз V_v и относительного разрыхления материала в виде показателя разрыхления ξ [35], то сумму их модулей $|V_v|$ и $|\xi|$ как проекций на металлографический шлиф можно связать с показателем использования запаса пластичности материала Ψ .

Показатель Ψ тесно связан с разрыхлением материала при деформации ξ [27], вследствие чего «объемные доли неметаллических включений в стали или пор в спеченных материалах являются основными критериями качества и поэтому используются при заводском контроле этих материалов» [18].

Эта связь позволяет проводить суммарный подсчет избыточных фаз и образованных их растворением пустот по весовому методу ГОСТ 21073.4–75 [39], принимая, что в каждый малый момент времени и в каждой точке $|V_v| + |\xi| = \text{const}$. Согласно принципу линейного сложения повреждений [37], исходный материал уже имеет некоторое количество избы-

точных фаз $V_{v\text{ исх}}$. Тогда связь его поврежденности с деформацией можно представить как

$$V_{v\text{ деф}} = |V_{v\text{ исх}}| + |d\xi|, \quad (5)$$

где $V_{v\text{ деф}}$ — пластическое разрыхление материала после деформации; $d\xi$ — пластическое разрыхление исходного материала.

Обозначая отношение $d\xi/\xi_k$ как приращение поврежденности $d\xi/\xi_{kp} = d\omega$, после интегрирования выражения (1) по верхнему пределу $\lambda_i = \lambda_{пр}$ без учета параметра $V_{v\text{ исх}}$ и показателя пластического разрыхления материала заготовки $\xi_{исх}$ выражение приращения поврежденности В.И. Колмогорова запишем как [27]

$$\omega = \int_0^{\Lambda_{пр}} \frac{\alpha \Lambda^{x-1}}{\Lambda_{пр}^x} d\Lambda, \quad (6)$$

где x — показатель накопленной материалом деформации.

С учетом показателей $V_{v\text{ исх}}$ и $\xi_{исх}$ выражение (6) принимает вид

$$\omega = |V_{v\text{ исх}}| + |\xi_{исх}| + \int_0^{\Lambda_{пр}} \frac{\alpha \Lambda^{x-1}}{\Lambda_{пр}^x} d\Lambda. \quad (7)$$

Таким образом, выражения (1)–(7) показывают возможность совместного рассмотрения показателя пластического разрыхления $|\xi|$ и объемной доли избыточных фаз $|V_v|$ как аргументов функции поврежденности материала ω . Опираясь на это, можно найти зависимости между параметрами пластической деформации и особенностями структуры материала в виде суммы показателей $|V_v|$ и $|\xi|$ как проекции на плоскость металлографического шлифа ($|V_v| + |\xi|$).

Материал и условия эксперимента. В качестве типовых штампованных поковок рассматривали осесимметричные фланцы изделий новой техники [1, 2]. Такие поковки относят к группе 3 по ОСТ 92-1619-87 [23] с обязательным соответствием направления волокон материала профилю готовой детали для получения лучшей герметичности. Макрошлифы изготовленных по различным режимам поковок из сплавов АМг3 и АМг6 показаны на рис. 2.

Геометрические характеристики поковок [1] позволяют оценить их пластическую деформацию при ковке и штамповке как близкую к монотонной [27, 30, 38]. Это дает возможность применять выражения (1)–(7) без учета показателя жесткости напряженного состояния Смирнова — Аляева [38].

Для получения фланцев применяли гидравлический пресс П2547 с насосно-аккумуляторным приводом и максимальным усилием 50 МН при скорости рабочего хода 0,01...0,08 м/с [40]. Использовали осажённые с различной степенью исходные заготовки размером 100×125 мм с фасками 3 мм или вырезанные из горячекатаных плит толщиной 30 мм круги с такими же фасками. Температура нагрева заготовок перед деформацией составляла 320 и 420 °С соответственно.

Математическое моделирование деформации проводили с использованием основанного на методе конечных элементов программного продукта QForm [41]. Для оценки приближенности диаметра заготовки к диаметру поковки фланца применяли условный коэффициент формы, принятый для прутка диаметром 100 мм равным единице, а для заготовки толщиной 30 мм, равной наибольшему диаметру

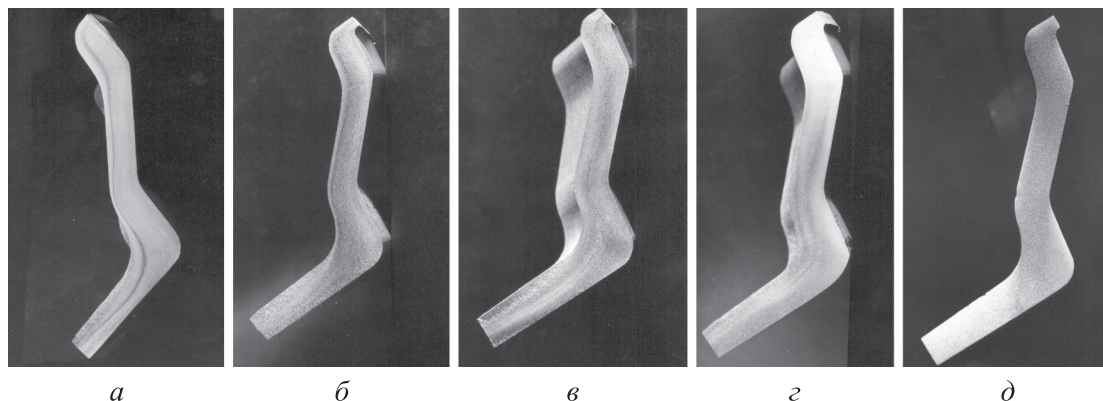


Рис. 2. Модели макрошлифов фланцев из сплавов АМг3 (а) и АМг6 (б–д) с наибольшей достигнутой логарифмической деформацией, равной примерно 3,8 (а), 3,5 (б, в), 3,4 (г) и 2,6 (д) при нагреве заготовок до температуры 420 (а–в) и 320 °С (г, д)

поковки 205 мм, — 2,05. Микротвердость образцов определяли прибором ПМТ-3 по методике ГОСТ 9450–76 [42] в пяти точках при нагрузке 0,5 Н в течение 15 с.

Результаты эксперимента и их обобщение. Приведенные на рис. 2 макрошлифы поковок показывают наличие богатых избыточными фазами светлых полос, которые проявляются тем ярче, чем большую деформацию перенес материал поковки, и чем менее равномерно протекал этот процесс [1, 2, 36]. Это обусловлено тем, что, будучи более электроотрицательными относительно матрицы твердого раствора [43, 44], что особенно касается сплава Mg_5Al_8 [13], при травлении образцов они вытравливаются быстрее [1, 2, 36].

Расчетные значения деформаций, установленные весовым методом по ГОСТ 21073.4–75 по показанным на рис. 3 контрольным точкам в теле поковки, а также значения твердости и показателя $|V_v| + |\xi|$ исходных прутков и плит приведены в табл. 1. Здесь заготовки поковок 1–4 — осажженные прутки; заготовки поковок 5 и 6 — горячекатаные плиты толщиной 30 мм; образцы 7 и 8 — исходные прутки; УКФ — условный коэффициент формы, отражающий соотношение диаметров штампованной поковки и применяемой для ее изготовления заготовки.

По сечению полученных после нагрева до 420 °С поковок, кроме облоя и облоинного мостика, температура материала колеблется в диапазоне 455...485 °С. Наименьшая температура имеет место в единственной застойной зоне фланца (см. рис. 3, точка 2), а наибольшая — вблизи его облоинного мостика (точка 6).

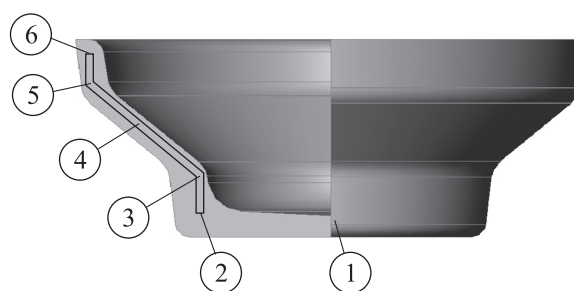


Рис. 3. Схема расположения детали и контрольных точек по сечению поковки фланца

С учетом этих уточнений характерный интервал температуры материала штампованных поковок можно оценить как 460...480 °С. Для полученной после нагрева до 320 °С поковки температура ее материала в описанных зонах составляет 377...393 °С, а характерная температура находится в пределах 380...390 °С, т. е. разброс ее значений в 2–2,5 раза меньше, чем при нагреве заготовок до 420 °С.

Так как избыточные фазы отличаются повышенной твердостью относительно матрицы материала [13], уменьшение его твердости с ростом показателя V_v является функцией пластического разрыхления ξ . Причем правила постановки исследовательских задач [33] в узком температурном интервале 20 и 10 °С для поковок, полученных после нагрева до 420 и 320 °С соответственно, позволяют принять температуру за константу и рассматривать зависимость твердости материала от суммарного показателя $|V_v| + |\xi|$ как функцию одной переменной.

Построенные по данным табл. 1 в среде Excel графические зависимости твердости от показателя

Таблица 1

Свойства материалов поковок и исходных прутков из сплавов АМг3 и АМг6

Номер образца	Марка сплава	УКФ	Логарифмическая деформация	Температура нагрева, °С	Температура в теле поковки, °С	$ V_v + \xi $, %	Твердость HV, МПа
1	АМг3	1,35	3,30/0,65	420	460...480	5,8...6,4	52...64
2	АМг3	1,35	2,70/0,75	320	380...390	5,1...5,9	59...71
3	АМг6	2,05	3,40/0,60	420	460...480	4,6...5,2	105...140
4	АМг6	2,05	2,80/0,70	320	460...480	4,3...5,0	112...144
5	АМг6	2,05	2,65/0,40	420	380...390	3,7...4,2	119...150
6	АМг6	2,05	2,45/0,50	320	380...390	3,4...3,9	127...154
7	АМг3	1,00	–	–	–	3,6...4,0	53...71
8	АМг6	1,00	–	–	–	3,3...3,7	105...145

Примечание. В числителе дроби указаны значения максимальной логарифмической деформации, в знаменателе — минимальной.

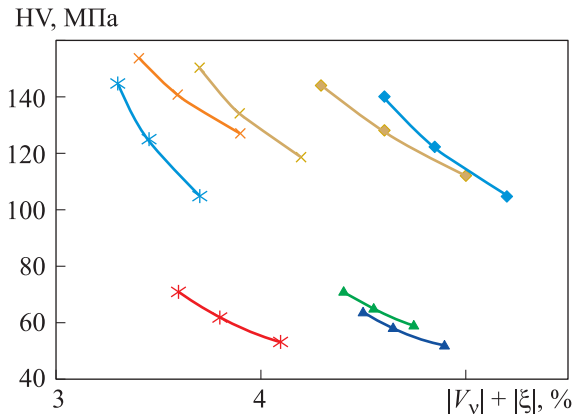


Рис. 4. Зависимости микротвердости HV исходных прутков АМг6 (—*), АМг3 (—*) и образцов 1 (—), 2 (—), 3 (—), 4 (—), 5 (—) и 6 (—) от показателя $|V_v| + |\xi|$

теля $|V_v| + |\xi|$ имеют экспоненциальной характер (рис. 4) и могут быть описаны выражением

$$HV = -C_1 \ln \left[(|V_{v \text{ исх}}| + |\xi_{\text{исх}}|) + (|V_{v \text{ деф}}| + |\xi_{\text{деф}}|) \right] + C_2, \quad (8)$$

где HV — микротвердость материала, МПа; $|V_{v \text{ исх}}| + |\xi_{\text{исх}}|$ и $|V_{v \text{ деф}}| + |\xi_{\text{деф}}|$ — показатели содержания избыточных фаз и разрыхленности материала до и после его деформации; C_1 , C_2 — постоянные для каждого материала и процесса.

Однако выражение (8) следует уточнить в той части, где зависимость твердости материала от показателя $|V_v| + |\xi|$ не может быть сведена только к одной экспоненте.

Первая причина этого заключается в том, что твердость материала с уменьшением показателя $|V_v| + |\xi|$ не может экспоненциально воз-

растать при асимптотическом приближении аргумента к нулевому значению, а вторая — в том, что при повышении показателей V_v и ξ твердость материала также не может бесконечно снижаться. Решить эту задачу можно с помощью полинома, приравняв значения твердости материала поковок при нулевой накопленной деформации к усредненной твердости материала заготовок.

Данные, приведенные в табл. 1, также позволяют выявить зависимость твердости материала HV от накопленной им деформации, сравнение которой с описанной зависимостью твердости материала от показателя $|V_v| + |\xi|$ позволит построить систему уравнений и сопоставить зависимости функций от различных переменных. То же можно сделать и с помощью графических методов [37].

Полученную в среде Excel зависимость микротвердости материала от накопленной им деформации в общем виде можно представить как

$$HV = C_1 e^{-C_2^x}, \quad \text{МПа.} \quad (9)$$

Зависимость (9) твердости HV от накопленной логарифмической деформации приведена на рис. 5, а, где исходная твердость материала прутков и плит в состоянии поставки отражена в виде синих (АМг6) и красных (АМг3) точек на оси ординат. Аналогично зависимости твердости материала от суммы $|V_v| + |\xi|$ при построении выражения (9) температура материала по сечению поковки принята постоянной, что позволяет рассматривать его как функцию одной переменной — накопленной деформации.

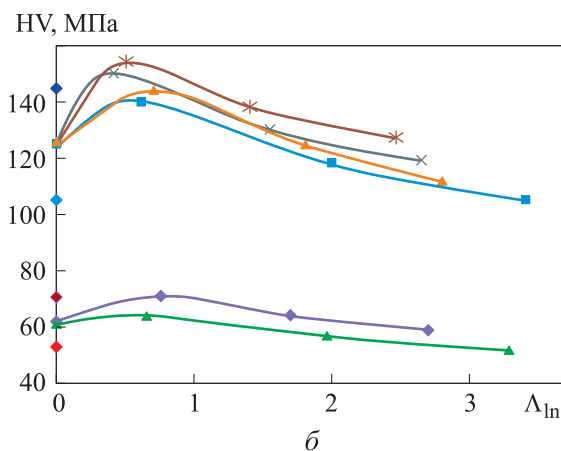
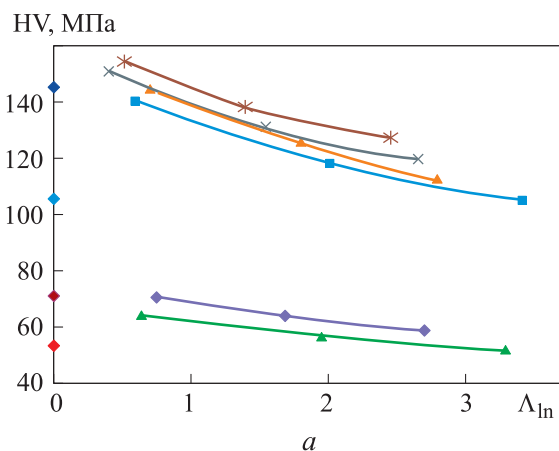


Рис. 5. Зависимости твердости материала HV образцов 1 (—), 2 (—), 3 (—), 4 (—), 5 (—) и 6 (—) от накопленной логарифмической деформации $\Lambda_{\ln}$ без учета (а) и с учетом (б) экспоненциального роста

Таблица 2

**Значения твердости материала поковок при различных значениях показателя $|V_v| + |\xi|$
и накопленной деформации**

Номер образца	Наибольшая логарифмическая деформация	Твердость HV, МПа	$ V_v + \xi \cdot 10^2, \%$	Формула для расчета твердости	
				без учета экспоненциального роста	с учетом экспоненциального роста
1	3,8	52...64	146...251	$y = 67,02e^{-0,078x}$	$y = 85,030e^{-0,002x}$
2	3,7	59...71	110...212	$y = 75,88e^{-0,095x}$	$y = 86,36e^{-0,002x}$
3	3,5	105...140	116...185	$y = 147,56e^{-0,103x}$	$y = 225,31e^{-0,004x}$
4	3,5	112...144	100...161	$y = 156,11e^{-0,12}$	$y = 216,03e^{-0,004x}$
5	3,4	119...150	50...85	$y = 155,06e^{-0,103x}$	$y = 206,44e^{-0,007x}$
6	2,6	127...154	40...71	$y = 160,49e^{-0,98x}$	$y = 196,29e^{-0,005x}$
7	–	53...71	50...60	–	$y = 126,48e^{-0,015x}$
8	–	105...145	25...35	–	$y = 322,84e^{-0,032x}$

Зависимость (9) также следует уточнить в части невозможности экспоненциального роста при асимптотическом приближении кривой значений твердости с уменьшением аргумента до близких к нулю значениям. Для этого твердость при нулевом значении аргумента принята равной твердости материала исходных заготовок так, как это показано на рис. 5, б.

Полученные в среде Excel уравнения, являющиеся интерполяцией сглаживающего сплайна полинома, приведены в табл. 2. Сопоставление приведенных на рис. 5, а и б графиков и данных из табл. 1 и 2 показывает, что для исключения недопустимого разрыхления $\xi_{кр}$ логарифмическая деформация материала не должна превышать 1,7...2,0.

При большей деформации твердость материала падает ниже таковой у исходных заготовок, что означает и соответствующее снижение их прочностных характеристик подобно тому, как это описано для сталей [45].

Отображенный на графиках рис. 5, б перегиб является не только математическим отражением невозможности экспоненциального роста при асимптотическом приближении кривой твердости с уменьшением аргумента до близких к нулю значениям. Его физический смысл состоит в том, что при начале деформации с нагрева до рекомендованных ОСТ 92-1619-87 и ПИ 1.2.085-78 температур, когда их распределение по сечению заготовки условно равномерное, и области локализованных деформаций еще не успели образоваться, материал упрочняется.

Образовавшись в ходе динамической рекристаллизации материала при повышенных температурах, особенно в зонах растягивающих напряжений, как отражение эффекта Ле-Шателье [46], далее в ходе технологических и иных нагревов избыточные фазы частично [16] растворяются в окружающей матрице, предопределяя его диффузионную пористость, как отложенный во времени дефект.

Следовательно, значение накопленной логарифмической деформации в пределах 2,0...2,25 выступит критерием качества материала независимо от формы поковок с тем лишь условием, чтобы его деформация была монотонной.

Данные табл. 2 также позволяют утверждать, что для поковок из сплавов АМг3 и АМг6 твердость, составляющая 55...65 и 144...125 соответственно, является показателем герметичности и необходимой прочности их материала, причем расчетная безопасная величина $|V_v| + |\xi|$ не должна превышать $(135...145) \cdot 10^{-2} \%$ для сплава АМг6, и $(190...200) \cdot 10^{-2} \%$ для сплава АМг3.

Выводы

1. Анализ образования и последующего неравномерного растворения избыточных фаз в алюминий-магниевого сплавах типа АМг показал допустимость такого приближения, как совместное рассмотрение выявленных по методике ГОСТ 21073.4-75 модулей металлографических проекций разрыхления деформированного материала ξ и объемного содержания в нем избыточных фаз V_v в виде описывающего

его дефектность суммарного показателя $|V_v| + |\xi|$.

2. Установлено, что в материале поковок из сплавов АМг3 и АМг6, полученных деформацией в интервале рекомендованных ОСТ 92-1619–87 и ПИ 1.2.085–78 температур, зависимость его твердости от показателя $|V_v| + |\xi|$ имеет отрицательный экспоненциальный характер с наличием характерного перегиба графика вблизи области начала развития деформаций с преобладанием их внутризеренного механизма.

3. На начальной стадии деформирования некоторое упрочнение материала заготовки ввиду преобладания внутризеренного механизма деформации повышает итоговую твердость металлического материала. По мере развития и локализации деформационных процессов ускоряется не только образование избыточных ин-

терметаллических фаз, но и их неравномерное растворение с образованием диффузионных пор как отложенный во времени дефект, особенно опасный при их строчечном расположении.

4. Выявлено, что для сохранения герметичности и приемлемой прочности материала поковок согласно ОСТ 92-4316–90 безопасный модуль проекции суммарного показателя $|V_v| + |\xi|$ не должен превышать $(135...145) \cdot 10^{-2} \%$ для сплава АМг6 и $(190...200) \cdot 10^{-2} \%$ для сплава АМг3.

5. Для обеспечения герметичности материала полученных по установленным ОСТ 92-1619–87 температурным и деформационным режимам поковок из алюминиево-магниевого сплава от АМг3 до АМг6 накопленная ими логарифмическая деформация должна составлять от 0,4...0,5 до 2,00...2,25.

Литература

- [1] Головкин П.А. Совершенствование процесса штамповки осесимметричных фланцев из алюминиево-магниевого сплава. Дисс. ... канд. тех. наук. Москва, МАТИ, 2004. 173 с.
- [2] Петров А.П., Головкин П.А. Перспективные технологии легких и специальных сплавов. Москва, Физматлит, 2006. 431 с.
- [3] ГОСТ Р 57945–2017. Система технологического обеспечения разработки и постановки на производство изделий космической техники. Термины и определения. Москва, Стандартинформ, 2018. 20 с.
- [4] ОСТ 92-1008–77. Штамповки и поковки из алюминиевых сплавов. Технические требования. Москва, ОНТИ-2, 1977. 34 с.
- [5] ОСТ 92-1019–81. Детали из алюминиевых и магниевых сплавов. Технические требования. Москва, ОНТИ-2, 1981. 67 с.
- [6] ОСТ 92-4316–90. Изделия отрасли. Порядок выбора методов контроля герметичности. Москва, ОНТИ, 1992. 56 с.
- [7] Головкин П.А. Контроль на пережог поковок из алюминиевого сплава АМг6. *Технология легких сплавов*, 2023, № 1, с. 90–96, doi: <https://doi.org/10.24412/0321-4664-2023-1-90-96>
- [8] Головкин П.А. О факторе количественного содержания интерметаллидных фаз в природе разрушения поковок из сплава АМг6. *Технология легких сплавов*, 2022, № 2, с. 15–19, doi: <https://doi.org/10.24412/0321-4664-2022-2-15-19>
- [9] Головкин П.А. Влияние интерметаллидных фаз на коррозионную стойкость листов и плит из сплава АМг6. *Технология машиностроения*, 2024, № 4, с. 28–33.
- [10] Головкин П.А. Повышение качества корпусов микросборок из сплавов группы АМг управлением количественного содержания в их материале интерметаллических соединений. *Металлообработка*, 2022, № 1, с. 43–50, doi: <https://doi.org/10.25960/мо.2022.1.43>
- [11] Головкин П.А. Повышение качества корпусов приборов изделий новой техники. *Технология машиностроения*, 2023, № 3, с. 29–32.
- [12] Головкин П.А. Повышение качества корпусов микросборок электронных СВЧ-приборов с использованием ковочных операций. *Сварочное производство*, 2022, № 2, с. 52–54.
- [13] Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. Москва, Металлургия, 1979. 640 с.
- [14] Фридляндер И.Н., ред. Металловедение алюминия и его сплавов. Москва, Металлургия, 1983. 280 с.

- [15] Арсентьев П.П., Коледов Л.А. *Металлические расплавы и их свойства*. Москва, Металлургия, 1976. 375 с.
- [16] Зайт В. *Диффузия в металлах*. Москва, Изд-во иностранной литературы, 1958. 381 с.
- [17] Осинцев О.Е., Никитин С.Л. *Высокопрочные коррозионностойкие литейные алюминиевые сплавы системы Al-Mg с повышенным содержанием кремния*. Москва, МАТИ, 2008. 264 с.
- [18] Чернявский К.С. *Стереология в металловедении*. Москва, Металлургия, 1977. 279 с.
- [19] Лякишев Н.П., ред. *Диаграммы состояния двойных металлических систем*. Т. 1. Москва, Машиностроение, 1996. 992 с.
- [20] ТР 50-31-70. *Гомогенизация слитков алюминиевых сплавов*. Москва, ВИС, 1970. 24 с.
- [21] ГОСТ 4784-2019. *Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки*. Москва, Стандартинформ, 2019. 30 с.
- [22] Захаров В.В. *Разработка научных основ легирования алюминиевых сплавов, предназначенных для прессования, и термической обработки слитков из них*. Автореф. дисс. ... док. тех. наук. Москва, ВИС, 1988. 46 с.
- [23] ОСТ 92-1619-87. *Заготовки штампованные из алюминиевых сплавов. Типовой технологический процесс горячей объемной штамповки*. Москва, ВИАМ, ОНТИ, 1985. 44 с.
- [24] ПИ 1.2.085-78. *Ковка и штамповка деформируемых алюминиевых сплавов*. Москва, ВИАМ, 1978. 17 с.
- [25] Осипов К.А. *Некоторые активируемые процессы в твердых металлах и сплавах*. Москва, Изд-во АН СССР, 1962. 131 с.
- [26] Иванова В.С., Терентьева В.Ф. *Природа усталости металлов*. Москва, Металлургия, 1975. 456 с.
- [27] Колмогоров В.Л. *Механика обработки металлов давлением*. Москва, Металлургия, 1986. 688 с.
- [28] Курсиков Ю.Н., Мурзов А.И. Механизм образования и пути уменьшения расслоений в деформированных алюминиевых сплавах. Алюминиевые сплавы и специальные материалы. *Труды ВИАМ*, 1975, № 9, с. 106-115.
- [29] Дриц М.Е., Корольков А.М., Гук Ю.П. др. *Разрушение алюминиевых сплавов при растягивающих напряжениях*. Москва, Наука, 1973. 215 с.
- [30] Алюшин Ю.А., Еленев С.А., Кузнецов С.А. и др. *Энергетическая модель обратимых и необратимых деформаций*. Москва, Машиностроение, 1995. 128 с.
- [31] Богатов А.А., Мижирицкий О.И., Смирнов С.В. *Ресурс пластичности при обработке металлов давлением*. Москва, Металлургия, 1984. 144 с.
- [32] Бологов Г.А., Добровольский В.Е. Деформация и разрушение теплостойких сталей и сплавов. *Мат. конф. Порообразование при ползучести дисперсионно-твердеющей стали*. Москва, Изд-во МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского, 1981, с. 54-57.
- [33] Новик Ф.С., Арсов Я.Б. *Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования эксперимента*. Москва, Машиностроение, 1980. 304 с.
- [34] Колмогоров В.Л. *Напряжения, деформации, разрушение*. Москва, Металлургия, 1970. 230 с.
- [35] Колмогоров В.Л., ред. *Пластичность и разрушение*. Москва, Металлургия, 1977. 336 с.
- [36] Галкин В.И., Головкин П.А. О влиянии механизмов деформации на структуру и свойства металлического материала. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2021, № 5, с. 207-214.
- [37] Гун Г.Я. *Теоретические основы обработки металлов давлением*. Москва, Металлургия, 1980. 456 с.
- [38] Смирнов-Аляев Г.А. *Сопротивление материалов пластическим деформациям*. Москва, Ленинград, Машгиз, 1949. 248 с.
- [39] ГОСТ 21073.4-75. *Металлы цветные. Определение величины зерна планометрическим методом*. Москва, Изд-во стандартов, 2002. 32 с.
- [40] Мансуров И.З., Подрабинник И.М. *Специальные кузнечно-прессовые машины и автоматизированные комплексы кузнечно-штамповочного производства*. Москва, Машиностроение, 1990. 344 с.

- [41] Власов А.В., ред. *Конечно-элементное моделирование технологических процессов ковки и объемной штамповки*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. 384 с.
- [42] ГОСТ 9450–76. *Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников*. Москва, Изд-во стандартов, 1993. 35 с.
- [43] Смирнов-Аляев Г.А. *Сопротивление материалов пластическому деформированию*. Ленинград, Машиностроение, 1978. 368 с.
- [44] Синявский В.С., Вальков В.Д., Калинин В.Д. *Коррозия и защита алюминиевых сплавов*. Москва, Metallurgiya, 1986. 368 с.
- [45] Марковец Н.П. *Определение механических свойств металлов по твердости*. Москва, Машиностроение, 1979. 191 с.
- [46] Пригожин И., Дефэй Р. *Химическая термодинамика*. Новосибирск, Наука, 1966. 509 с.

References

- [1] Golovkin P.A. *Sovershenstvovanie protsessa shtampovki osesimmetrichnykh flantsev iz alyuminiyevo-magnievyykh splavov*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the stamping process for axisymmetric flanges from aluminum-magnesium alloys. Kand. tech. sci. diss.]. Moscow, MATI Publ., 2004. 173 p. (In Russ.).
- [2] Petrov A.P., Golovkin P.A. *Perspektivnye tekhnologii legkikh i spetsialnykh splavov* [Advanced Technologies for Light and Special Alloys]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006. 431 p. (In Russ.).
- [3] GOST R 57945–2017. *Sistema tekhnologicheskogo obespecheniya razrabotki i postanovki na proizvodstvo izdeliy kosmicheskoy tekhniki. Terminy i opredeleniya* [System technology software development and production of statement on space technology. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 20 p. (In Russ.).
- [4] OST 92-1008–77. *Shtampovki i pokovki iz alyuminiyevykh splavov. Tekhnicheskie trebovaniya* [Stampings and forgings made of Aluminium alloys. Technical requirements]. Moscow, ONTI-2 Publ., 1977. 34 p. (In Russ.).
- [5] OST 92-1019–81. *Detali iz alyuminiyevykh i magnievyykh splavov. Tekhnicheskie trebovaniya* [Details made of aluminium and magnesium alloys. Technical requirements]. Moscow, ONTI-2 Publ., 1981. 67 p. (In Russ.).
- [6] OST 92-4316–90. *Izdeliya otrasli. Poryadok vybora metodov kontrolya germetichnosti* [Industry products. Procedure for selecting methods of tightness control]. Moscow, ONTI Publ., 1992. 56 p. (In Russ.).
- [7] Golovkin P.A. Control on overburning of AMg6 aluminum alloy open forgings. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys], 2023, no. 1, pp. 90–96, doi: <https://doi.org/10.24412/0321-4664-2023-1-90-96> (in Russ.).
- [8] Golovkin P.A. About the factor of quantitative content of intermetallic phases in the nature of destruction of AMg6 alloy open forgings. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys], 2022, no. 2, pp. 15–19, doi: <https://doi.org/10.24412/0321-4664-2022-2-15-19> (in Russ.).
- [9] Golovkin P.A. The influence of intermetallic phases on the corrosion resistance of sheets and plates made of AMg6 alloy. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2024, no. 4, pp. 28–33. (In Russ.).
- [10] Golovkin P.A. Improving the quality of AMg-group mikroborods by controlling the quantitative containment of intermetallic connections in their material. *Metallrobrabotka* [Metalworking], 2022, no. 1, pp. 43–50, doi: <https://doi.org/10.25960/mo.2022.1.43> (in Russ.).
- [11] Golovkin P.A. Improving the quality of instrument housings for new technology products. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2023, no. 3, pp. 29–32. (In Russ.).
- [12] Golovkin P.A. Improving the microassemblies cases quality of the electronic microwave devices be using forging operations. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2022, no. 2, pp. 52–54. (In Russ.).
- [13] Mondolfo L.F. *Aluminum alloys: structure and properties*. Butterworth, 1976. 971 p. (Russ. ed.: *Struktura i svoystva alyuminiyevykh splavov*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979. 640 p.)
- [14] Fridlyander I.N., ed. *Metallovedenie alyuminiya i ego splavov* [Metallurgy of aluminum and its alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983. 280 p. (In Russ.).

- [15] Arsentyev P.P., Koledov L.A. *Metallicheskie rasplavy i ikh svoystva* [Metallic melts and their properties.]. Moscow, Metallurgiya, 1976. 375 p. (In Russ.).
- [16] Seith W. *Diffusion in Metallen*. Springer, 1955. 306 p. (Russ. ed.: *Diffuziya v metallakh*. Moscow, Izd-vo inostrannoy literatury Publ., 1958. 381 p.)
- [17] Osintsev O.E., Nikitin S.L. *Vysokoprochnye korroziionnostoykie liteynye alyuminievye splavy sistemy Al-Mg s povyshennym soderzhaniem kremniya* [High-strength corrosion-resistant cast aluminum alloys of the Al-Mg system with increased silicon content]. Moscow, MATI Publ., 2008. 264 p. (In Russ.).
- [18] Chernyavskiy K.S. *Stereologiya v metallovedenii* [Stereology in metallurgy.]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977. 279 p. (In Russ.).
- [19] Lyakishev N.P., ed. *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskikh sistem*. T. 1 [Phase diagrams of binary metallic systems. Vol. 1]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1996. 992 p. (In Russ.).
- [20] TR 50-31–70. *Gomogenizatsiya slitkov alyuminievykh splavov* [Homogenization of Aluminum Alloy Ingots.]. Moscow, VILS Publ., 1970. 24 p. (In Russ.).
- [21] GOST 4784–2019. *Alyuminiy i splavy alyuminievye deformiruemye. Marki* [Aluminium and wrought aluminium alloys. Grades]. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 30 p. (In Russ.).
- [22] Zakharov V.V. *Razrabotka nauchnykh osnov legirovaniya alyuminievykh splavov, prednaznachennykh dlya pressovaniya, i termicheskoy obrabotki slitkov iz nikh*. Avtoref. diss. dok. tekhn. nauk [Development of scientific principles for alloying aluminum alloys intended for pressing and heat treatment of ingots therefrom. Abs. doc. tech. sci. diss.]. Moscow, VILS Publ., 1988. 46 p. (In Russ.).
- [23] OST 92-1619–87. *Zagotovki shtampovannye iz alyuminievykh splavov. Tipovoy tekhnologicheskiy protsess goryachey obemnoy shtampovki* [Stamped billets made of Aluminium alloys. Typical technological process of volume hot forging]. Moscow, VIAM, ONTI Publ., 1985. 44 p. (In Russ.).
- [24] PI 1.2.085–78. *Kovka i shtampovka deformiruemykh alyuminievykh splavov* [Aluminium and wrought aluminium alloys. Grades]. Moscow, VIAM Publ., 1978. 17 p. (In Russ.).
- [25] Osipov K.A. *Nekotorye aktiviruemye protsessy v tverdykh metallakh i splavakh* [Some activated processes in hard metals and alloys]. Moscow, Izd-vo AN SSSR Publ., 1962. 131 p. (In Russ.).
- [26] Ivanova V.S., Terentyeva V.F. *Priroda ustalosti metallov* [The nature of metal fatigue.]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1975. 456 p. (In Russ.).
- [27] Kolmogorov V.L. *Mekhanika obrabotki metallov davleniem* [Mechanics of metal forming]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 688 p. (In Russ.).
- [28] Kursikov Yu.N., Murzov A.I. Mechanism of formation and ways to reduce delamination in deformed aluminum alloys. Aluminum alloys and special materials. *Trudy VIAM*, 1975, no. 9, pp. 106–115. (In Russ.).
- [29] Drits M.E., Korolkov A.M., Guk Yu.P. et al. *Razrushenie alyuminievykh splavov pri rastyagivayushchikh napryazheniyakh* [Fracture of aluminum alloys under tensile stresses.]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 215 p. (In Russ.).
- [30] Alyushin Yu.A., Elenev S.A., Kuznetsov S.A. et al. *Energeticheskaya model obratimyykh i neobratimyykh deformatsiy* [Energy model of reversible and irreversible deformations.]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1995. 128 p. (In Russ.).
- [31] Bogatov A.A., Mizhiritskiy O.I., Smirnov S.V. *Resurs plastichnosti pri obrabotke metallov davleniem* [Plasticity resource in metal forming.]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1984. 144 p. (In Russ.).
- [32] Bologov G.A., Dobrovolskiy V.E. [Deformation and fracture of heat-resistant steels and alloys]. *Mat. konf. Poroobrazovanie pri polzuchesti dispersionno-tverdeyushchey stali* [Proc. Conf. Pore Formation during Creep of Precipitation-Hardening Steel]. Moscow, Izd-vo MDNTP im. F.E. Dzerzhinskogo Publ., 1981, pp. 54–57. (In Russ.).
- [33] Novik F.S., Arsov Ya.B. *Optimizatsiya protsessov tekhnologii metallov metodami planirovaniya eksperimenta* [Optimization of metal technology processes by experimental planning methods]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 304 p. (In Russ.).
- [34] Kolmogorov V.L. *Napryazheniya, deformatsii, razrushenie* [Stresses, strains, and fracture]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970. 230 p. (In Russ.).

- [35] Kolmogorov V.L., ed. *Plastichnost i razrushenie* [Plasticity and fracture]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977. 336 p. (In Russ.).
- [36] Galkin V.I., Golovkin P.A. About influence of deformation mechanisms on the structure and properties of metallic material. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening Technologies and Coatings], 2021, no. 5, pp. 207–214. (In Russ.).
- [37] Gun G.Ya. *Teoreticheskie osnovy obrabotki metallov davleniem* [Theoretical foundations of metal forming]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1980. 456 p. (In Russ.).
- [38] Smirnov-Alyayev G.A. *Soprotivlenie materialov plasticheskim deformatsiyam* [Resistance of materials to plastic deformations]. Moscow, Leningrad, Mashgiz Publ., 1949. 248 p. (In Russ.).
- [39] GOST 21073.4–75. *Metally tsvetnye. Opredelenie velichiny zerna planometricheskim metodom* [Non-ferrous metals. Determination of grain size by planimetric method]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 2002. 32 p. (In Russ.).
- [40] Mansurov I.Z., Podrabinnik I.M. *Spetsialnye kuznechno-pressovye mashiny i avtomatizirovannye komplekсы kuznechno-shtampovochnogo proizvodstva* [Specialized forging and pressing machines and automated complexes for forging and stamping production]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 344 p. (In Russ.).
- [41] Vlasov A.V., ed. *Konechno-elementnoe modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov kovki i obemnoy shtampovki* [Finite element modeling of forging and die forging processes.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2019. 384 p. (In Russ.).
- [42] GOST 9450–76. *Izmerenie mikrotverdsti vдавlivaniem алмазных наконечников* [Measurements microhardness by diamond instruments indentation]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1993. 35 p. (In Russ.).
- [43] Smirnov-Alyayev G.A. *Soprotivlenie materialov plasticheskomu deformirovaniyu* [Resistance of materials to plastic deformation.]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1978. 368 p. (In Russ.).
- [44] Sinyavskiy V.S., Valkov V.D., Kalinin V.D. *Korroziya i zashchita alyuminievyykh splavov* [Corrosion and protection of aluminum alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 368 p. (In Russ.).
- [45] Markovets N.P. *Opredelenie mekhanicheskikh svoystv metallov po tverdosti* [Determination of mechanical properties of metals by hardness]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 191 p. (In Russ.).
- [46] Prigogine I., Defay R. *Chemical thermodynamics*. Wiley, 1962. 543 p. (Russ. ed.: *Khimicheskaya termodinamika*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1966. 509 p.)

Статья поступила в редакцию 13.11.2025

Информация об авторе

ГОЛОВКИН Павел Александрович — кандидат технических наук, начальник лаборатории входного контроля материалов. АО «Плутон» (105120, Москва Российская Федерация, ул. Нижняя Сыромятническая, д. 11, e-mail: pavelgolovkin527@gmail.com).

Information about the author

GOLOVKIN Pavel Aleksandrovich — Candidate of Science (Eng.), Head of Materials Input Control Laboratory. Pluton JSC (105120, Moscow, Russian Federation, Nizhnaya Syromyatnicheskaya St., Bldg. 11, e-mail: pavelgolovkin527@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Головкин П.А. Феноменология критериев качества материала поковок из сплавов группы АМг. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 8, с. 42–53.

Please cite this article in English as:

Golovkin P.A. Phenomenology of quality criteria material forgings from aluminum-magnesium alloys AMg group. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 8, pp. 42–53.