

Научная статья

УДК 669.715

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-23-33

МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ЗАКАЛКЕ ВЫСОКОПРОЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Ю.Н. Нефедова¹, Т.А. Шляпникова¹, А.Л. Иванов¹, В.В. Сидельников¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Снижение коробления и остаточных напряжений при закалке – актуальная проблема при производстве деталей и полуфабрикатов из алюминиевых сплавов. В качестве охлаждающей среды при закалке обычно применяют воду, причем для объемных штамповок в зависимости от состава сплава – горячую или кипящую. Однако вода как закалочная среда имеет существенные недостатки: неравномерность (трехстадийность) охлаждения вследствие изменения агрегатного состояния, резкость охлаждения и, соответственно, создание большого коробления и остаточных напряжений в случае использования холодной воды, недостаточную степень снижения коробления и остаточных напряжений при охлаждении в горячей воде, низкую скорость охлаждения и, соответственно, ухудшение свойств большинства сплавов при закалке в кипящей воде. Подробно рассматриваются различные методы снижения коробления и остаточных напряжений в деталях из высокопрочных алюминиевых сплавов при закалке.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, малодеформационная закалка, закалка в полимерной среде, закалка в криогенной среде, закалка с использованием плакирования, остаточные напряжения, коробление, механические свойства

Для цитирования: Нефедова Ю.Н., Шляпникова Т.А., Иванов А.Л., Сидельников В.В. Методы снижения остаточных напряжений при закалке высокопрочных алюминиевых сплавов // Труды ВИАМ. 2023. № 7 (125). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-23-33.

Scientific article

METHODS FOR REDUCING RESIDUAL STRESSES DURING HARDENING OF HIGH-STRENGTH ALUMINUM ALLOYS

Yu.N. Nefedova¹, T.A. Shlyapnikova¹, A.L. Ivanov¹, V.V. Sedelnikov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Reducing warpage and residual stresses during hardening is an urgent problem in the production of parts and semi-finished products from aluminum alloys. Water is usually used as a cooling medium during quenching, and, for volumetric forgings, hot or boiling water, depending on the composition of the alloy. However, water as a quenching medium has significant drawbacks: uneven (three-stage) cooling due to a change in the state of aggregation, sharpness of cooling and, accordingly, the creation of large warpage and residual stresses in the case of using cold water, an insufficient degree of reduction in warpage and residual stresses during cooling in hot water, low speed cooling and, accordingly, the deterioration of the properties of most alloys during quenching in boiling water. Discusses in detail various methods for reducing warping and residual stresses during hardening in parts made of high-strength aluminum alloys.

Keywords: aluminium alloy, low-distortion quenching, polymer medium, uphill quenching, cladding quenching, residual stress, distortion, mechanical properties

For citation: Nefedova Yu.N., Shlyapnikova T.A., Ivanov A.L., Sedelnikov V.V. Methods for reducing residual stresses during hardening of high-strength aluminum alloys. *Trudy VIAM*, 2023, no. 7 (125), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-23-33.

Введение

Алюминиевые сплавы широко применяются в авиакосмической промышленности. На их долю приходится 70 % массы планера современных самолетов. Постоянное повышение летных характеристик, надежности, долговечности и увеличение габаритов летательных аппаратов выдвигают новые требования к алюминиевым полуфабрикатам и деталям, связанные с обеспечением необходимого комплекса свойств [1].

В последнее время в аэрокосмической промышленности значительно возросло применение тонкостенных монолитных деталей из высокопрочных алюминиевых сплавов с высокой удельной прочностью, так как снижение общей массы деталей, уменьшение расхода топлива и компактные размеры имеют большое практическое значение [2–6].

Сложноконтурные детали имеют повышенные закалочные напряжения и коробление при механической обработке из-за больших перепадов толщин. Основными проблемами при закалке тонкостенных деталей из высокопрочных алюминиевых сплавов являются деформация и нестабильность размеров, которые приводят к увеличению брака и дополнительным затратам на производство [7]. Деформация и нестабильность размеров деталей из алюминиевых сплавов являются следствием наличия остаточных напряжений, которые возникают при закалке из-за резкого термического градиента на поверхности и в центре заготовки, что в свою очередь приводит к короблению обрабатываемых деталей. Уменьшение температурного градиента от центра заготовки к поверхности является основным направлением по снижению остаточных напряжений при закалке.

Основной охлаждающей средой при закалке алюминиевых сплавов является вода – преимущественно холодная (до 40 °С), в ряде случаев горячая (70–80 °С) и кипящая (95–100 °С), например, для закалки объемных штамповок из сплавов типа В93, АК6 и АК4-1 [7].

Однако вода как закалочная среда имеет существенные недостатки: неравномерность (трехстадийность) охлаждения вследствие изменения агрегатного состояния, резкость охлаждения и как следствие сильное коробление из-за высоких остаточных напряжений при охлаждении в холодной воде, либо низкую скорость охлаждения и соответственно ухудшение свойств большинства сплавов при закалке в горячей и кипящей воде.

При анализе современного состояния исследований в области снижения остаточных напряжений в алюминиевых сплавах можно выделить следующие подходы: механические методы [8–11], методы термической обработки [12, 13] и закалку в водно-полимерных средах [14–24].

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексного научного направления 8.1. «Высокопрочные свариваемые алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы пониженной плотности с повышенной вязкостью разрушения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

Закалка в водно-полимерной и криогенной средах

О перспективах использования в качестве закалочных сред водных растворов полимеров, обладающих свойством «обратной растворимости», заявлено еще в семидесятых годах прошлого столетия [19, 20]. Установлено, что изменение режима охлаждения в таких растворах, по сравнению с охлаждением в воде, связано с образованием на горячей поверхности металла тонкой пленки осаждающегося из раствора полимера, которая снова растворяется в воде при охлаждении поверхности металла. По мере остывания детали, эта пленка растворяется в растворе снова. Изменяя процентное содержание этих веществ в растворе можно регулировать скорость охлаждения применительно

к типу закаливаемого сплава и сечению детали, а также значительно уменьшить коробление и остаточные напряжения.

Преимущества закалочных сред на основе водных растворов полимеров очевидны: в отличие от масел – они не горят, не выделяют дыма, легко смываются с поверхности закаливаемых материалов; в отличие от воды – существенно уменьшается коробление и остаточные напряжения в алюминиевых сплавах, а также возможно регулировать скорость охлаждения, изменяя концентрацию полимеров в растворе [21].

За рубежом для снижения коробления при термической обработке полуфабрикатов и деталей из алюминиевых сплавов используют водно-полимерные среды с высококонцентрированной (до 40 %) добавкой полиалкиленгликоля (ПАГ).

В 1980-х годах большим коллективом сотрудников ВИАМ, НИОХ СО РАН и НИАТ была разработана малоцентрированная закалочная среда (до 1,5 %) для конструкционных алюминиевых сплавов. Закалочная среда являлась водным раствором двух отечественных компонентов, обладающих свойством обратной растворимости: полиэтиленоксида (ПЭО) высокой молекулярной массы и неионогенных поверхностно-активных веществ (ПАВ) – оксиэтилированных алифатических спиртов и алкилфенолов. Подробное изучение механизма охлаждения в полимерной среде (ПЭО и ПАВ) показало, что этот механизм близок к механизму охлаждения в высококонцентрированной импортной среде на основе водных растворов ПАГ [22].

Изменяя концентрацию компонентов среды, можно в широком диапазоне варьировать скорость охлаждения деталей. Допустимое снижение скорости охлаждения и, соответственно, максимальная концентрация компонентов регламентируются необходимостью обеспечения комплекса заданных свойств закаливаемых деталей или полуфабрикатов (механических, коррозионных, характеристик усталости и трещиностойкости) и определяются прежде всего критической скоростью охлаждения сплава. Критическая скорость – это скорость охлаждения в интервале температур от 400 до 260 °С (для большинства алюминиевых сплавов), т. е. наименьшая скорость, позволяющая предотвратить распад пересыщенного алюминиевого твердого раствора в процессе охлаждения [22].

Результаты исследований показали, что малоцентрированная среда с полимерными добавками ПЭО (S-A) и ПАВ (синтанол ДС-10) обеспечивает более равномерное охлаждение образцов по сравнению с охлаждением в воде, при этом снижается скорость охлаждения, что приводит к уменьшению степени коробления (рис. 1) [22].

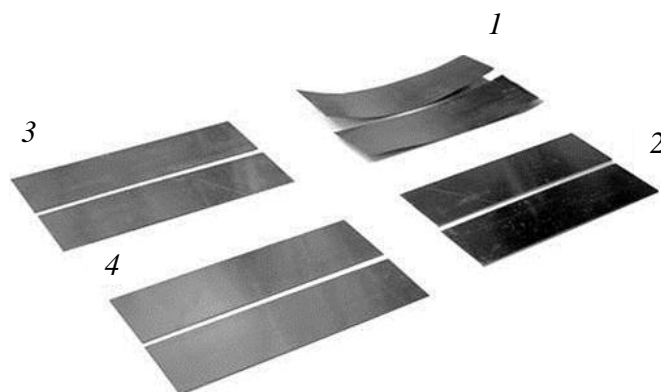


Рис. 1. Внешний вид пластин из сплава Д16ч. после закалки в разных средах:

- 1 – в воде; 2 – в растворе № 1 ПЭО (S-A) + ПАВ;
- 3 – в растворе № 2 ПЭО (S-A) + ПАВ – рабочий раствор;
- 4 – в растворе ПАГ (Aqua-Quench 260) [22]

Принципиальное отличие этой закалочной среды от импортных сред на основе ПАГ заключается в том, что она имеет низкую концентрацию полимеров в растворе (в сумме не более 2 %) по сравнению с концентрацией ПАГ (12–40 %) [22]. Благодаря малому содержанию полимеров облегчается смыв их остатков с поверхности закаленных деталей, повышается экологическая безопасность среды при ее утилизации, а также воды для промывания.

Еще одним из перспективных методов для уменьшения остаточных напряжений является закалка в криогенной среде (жидком азоте), которая в основном применяется для деталей, имеющих сложную геометрическую форму. По сравнению с водой жидкий азот имеет в ~11 раз меньшую теплоту парообразования (удельная теплота испарения воды составляет 539 кал/г, а жидкого азота 47,5 кал/г), поэтому на закаливаемых деталях мгновенно образуется тонкая устойчивая пленка газообразного азота. Режим пленочного кипения сохраняется в течение всего периода охлаждения детали, что обеспечивает ее минимальное коробление. Однако быстрое повышение температуры при воздействии пара ограничило широкое применение данного метода.

В работе [23] исследована взаимосвязь между остаточными напряжениями, вызванными закалкой в холодной воде, полимерной и криогенной средах, и деформацией тонкостенных деталей при механической обработке.

Цилиндрические тонкостенные детали из сплава 7075 системы Al–Zn–Mg–Cu термообработывали тремя вышеприведенными способами. Эффективность каждого метода оценивали путем измерения остаточных напряжений. Наличие остаточных напряжений связано с геометрической формой заготовки, толщиной и перепадами температуры в процессе закалки. Снижение остаточных напряжений при закалке является следствием уменьшения температурного градиента от центра заготовки к ее поверхности [23].

Для оценки эффективности методов закалки в полимерной и криогенной средах на снижение остаточных напряжений, по сравнению с закалкой в воде, также проведено несколько экспериментов на цилиндрических заготовках из сплава 7075-T6 диаметром 60 мм. Заготовки разделили на три группы и подвергли испытаниям в различных экспериментальных условиях. *Первую группу* заготовок нагревали в течение 20 мин при температуре $470 \pm 5^\circ\text{C}$ для последующей закалки. Далее детали закаливали в воде с температурой 25°C , после чего проводили старение в печи при температуре 120°C в течение 24 ч (режим термообработки – T6). Установлено, что старение снижает остаточные напряжения, вызванные закалкой, на 15 % [23]. *Вторую группу* заготовок после нагрева под закалку охлаждали в 32%-ном полимерном растворе ПАГ, а затем детали также подвергали старению. *Третью группу* заготовок после нагрева под закалку погружали на 30 мин в емкость с жидким азотом температурой -196°C . По истечении этого времени детали помещали в паровую камеру с давлением водяного пара 1,4 МПа до тех пор, пока температура деталей не достигнет $\sim 200^\circ\text{C}$, после чего также проводили искусственное старение.

По результатам проведенных исследований установлено, что при закалке деталей из алюминиевого сплава в холодной воде резкие температурные перепады и различные скорости охлаждения приводят к образованию очень высоких уровней остаточных напряжений: в поверхностной области – до 230 МПа, а в центральной части 100 МПа. В закаленных деталях сжимающие напряжения развиваются на поверхности, а растягивающие – в центре детали. В детали, подвергаемой закалке (охлаждению) в растворе ПАГ, уровень остаточных напряжений в центральной части составил 60 МПа, в поверхностной области 30 МПа, что значительно ниже, чем в детали, закаленной в холодной воде. Уровень остаточных напряжений в детали, закаленной в криогенной среде, составил в центральной части 70 МПа, в поверхностной области 50 МПа. Недостигнутый уровень ожидаемого снижения остаточных напряжений при данном методе связан с его сложной реализацией (рис. 2).

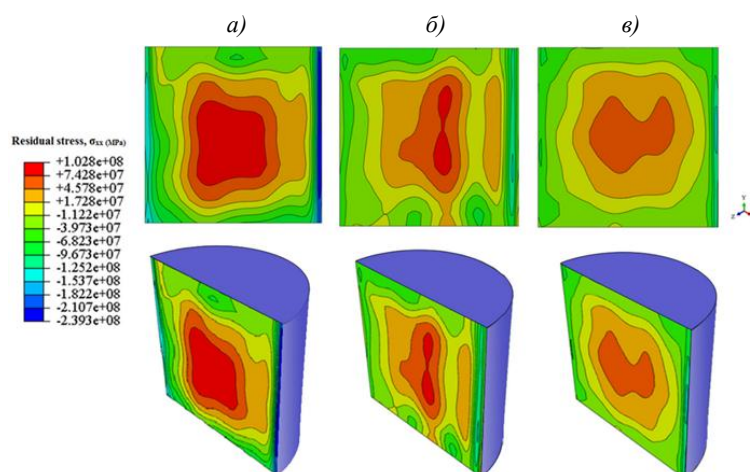


Рис. 2. Распределение остаточных напряжений в деталях из сплава 7075, закаленных в холодной воде (а), криогенной среде (б) и полиалкиленгликоле (в) [23]

В работе [24] также исследовано влияние закалки в криогенной среде на тонкостенную конструкцию по отношению к снижению остаточных напряжений и коробления, в сравнении с закалкой в холодной воде и в 30%-ном растворе ПАГ.

Объектом исследования являлись прямолинейные полые детали, изготовленные из высокопрочного алюминиевого сплава 7449 системы Al–Zn–Mg–Cu (рис. 3).

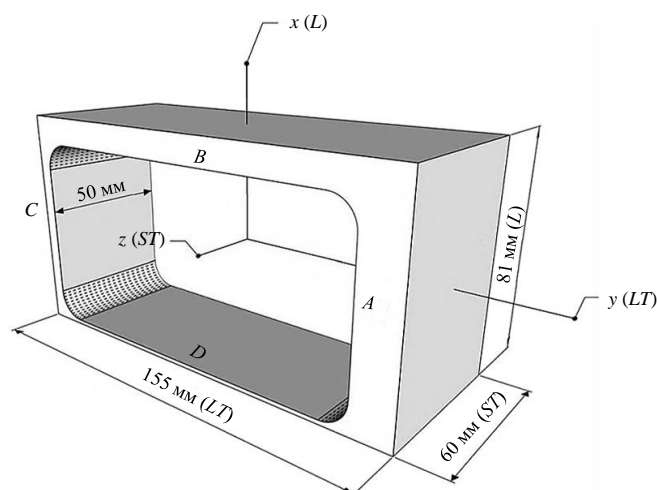


Рис. 3. Геометрическая форма и размеры детали из сплава 7449 [24]

Детали термообработывали с использованием вышеперечисленных методов, в том числе включая закалку в криогенной среде при температуре $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ с последующей обработкой паром с температурой до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. После чего оценивали величину остаточных напряжений.

Результаты измерения остаточных напряжений показали, что в детали, закаленной в растворе ПАГ, практически отсутствовали остаточные напряжения.

Установлено, что по сравнению с обычной закалкой в холодной воде использование раствора ПАГ и закалка в криогенной среде позволяют значительно (в 1,5 раза) снизить остаточные напряжения. Однако в то время как закалка в растворе ПАГ приводит к равномерному снижению остаточного напряжения и коробления по всей площади детали, закалка в криогенной среде оказывает локальный эффект и ограничивается областями, находящимися в непосредственной близости от воздействия пара (рис. 4 и 5).

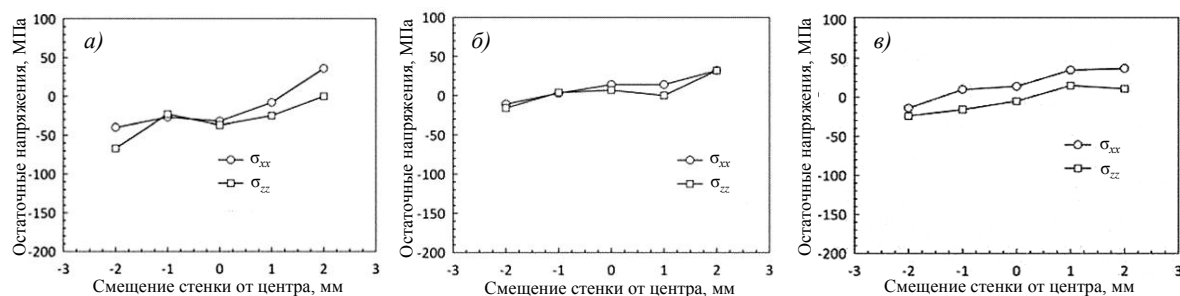


Рис. 4. Остаточные напряжения (σ) в стенке толщиной 5 мм детали из сплава 7449 после закалки в холодной воде (а), 30%-ном растворе полиалкиленгликоля (б) и криогенной среде (в) [24]

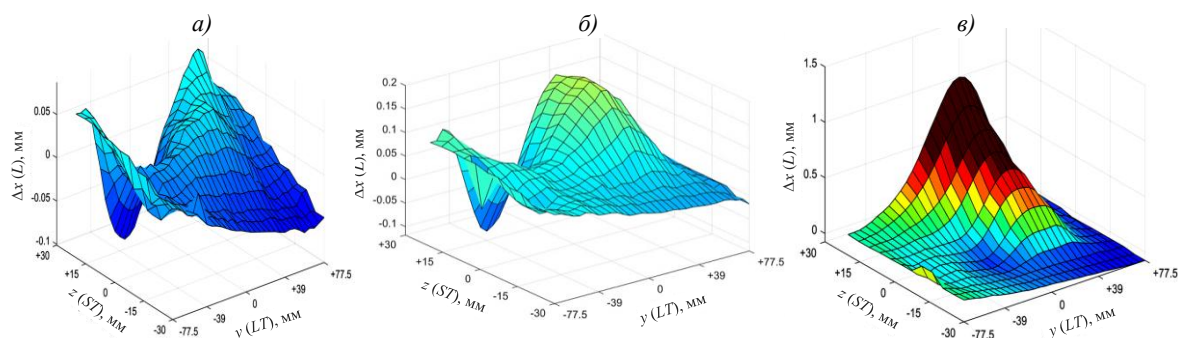


Рис. 5. Коробление стенки толщиной 1,5 мм детали из сплава 7449 после закалки в растворе полиалкиленгликоля (а), холодной воде (б) и криогенной среде (в) [24]

Таким образом, исследование закалки в водно-полимерной и криогенной средах показало, что применение данных методов позволяет значительно снизить уровень остаточных напряжений в деталях по сравнению с закалкой деталей в холодной воде. Однако закалка в криогенной среде требует дорогостоящего оборудования и уникальной оснастки для каждой конкретной геометрической формы детали и способна лишь локально снимать напряжения в алюминиевых сплавах, что делает ее гораздо менее эффективной по сравнению с закалкой в растворе ПАГ. В свою очередь закалка в ПАГ сопряжена с экологическими издержками, так как раствор необходимо утилизировать надлежащим образом после использования, а гель может загрязнять поверхность деталей, поэтому может потребоваться дополнительная очистка. Закалка в малоцентрированной полимерной среде на основе ПЭО и ПАВ обеспечивает более равномерное охлаждение образцов по сравнению с закалкой в холодной воде, что приводит к снижению коробления при сохранении необходимого уровня механических свойств. Благодаря малому содержанию полимеров, облегчается смыв их остатков с поверхности закаленных деталей, повышается экологическая безопасность среды при ее утилизации, а также воды для промывания.

Закалка с использованием плакирования

Для снижения закалочных остаточных напряжений в работе [25] предложен новый метод закалки с использованием плакирования, при котором высокотемпературный неорганический клей и алюминиевая фольга наносятся на поверхности пластин из сплава 7150 системы Al–Zn–Mg–Cu.

В качестве объекта исследования взяты образцы длиной 80 мм и шириной 40 мм из сплава 7150. Суть эксперимента состояла в том, что перед закалкой на образцы наносили плакирующий слой, состоящий из высокотемпературного неорганического клея, толщиной 0,2; 0,4 и 0,6 мм и алюминиевую фольгу.

Шесть поверхностей образца покрывали однородно распределенным неорганическим клеем, а затем поверхностный слой закрывали алюминиевой фольгой (рис. 6).

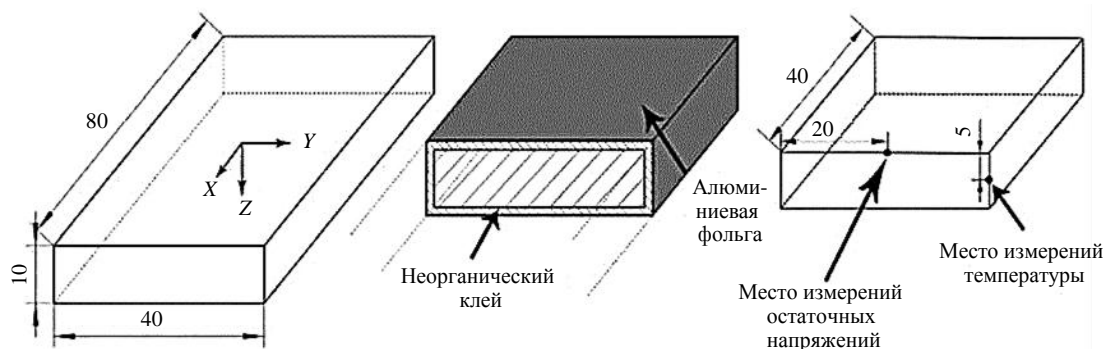


Рис. 6. Схема экспериментального образца [25]

Высокотемпературный неорганический клей обладает высокой термостойкостью – до 1200 °С, и выбран благодаря тому, что у него отсутствует устойчивость к горячей воде, поэтому его можно легко удалить после закалки.

После плакирования образцы сушили при температуре 90 °С в течение 1 ч, а затем при 150 °С в течение 1 ч с последующим охлаждением на воздухе. Плакированные и неплакированные образцы подвергали нагреву под закалку при температуре 475 °С в течение 1,5 ч с последующим быстрым погружением их в воду.

Образцы без покрытия закачивали в горячей воде при температуре 90 °С, а затем опускали в холодную воду с температурой 25 °С. Плакированные образцы закачивали в холодной воде. Внешний вид образцов представлен на рис. 7.

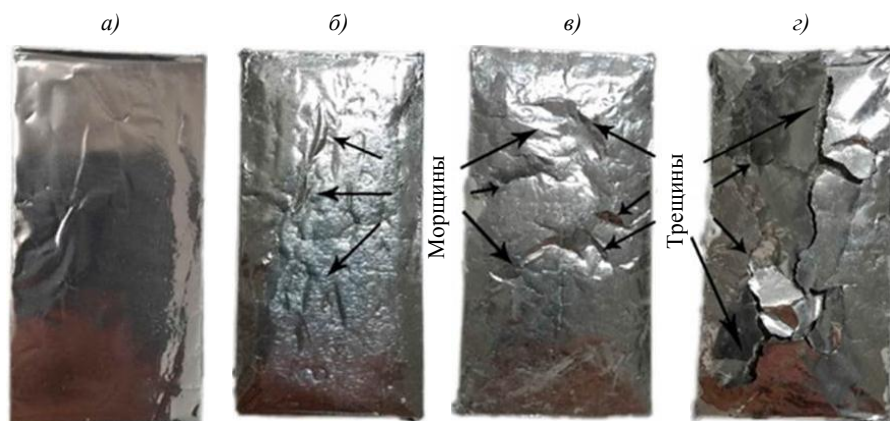


Рис. 7. Поверхность образцов перед (а) и после закалки с толщиной плакирующего слоя 0,2 (б); 0,4 (в) и 0,6 мм (г) [25]

Результаты измерения остаточных напряжений в образцах показали, что величина остаточных напряжений неплакированных образцов, закаленных в холодной и горячей воде, составила 142 и 81,4 МПа соответственно, а величина остаточных напряжений в плакированных образцах, закаленных в холодной воде, с толщиной плакирующего слоя 0,2; 0,4 и 0,6 мм составила соответственно 33,8; 27,4 и 14,2 МПа (рис. 8).

Результаты определения твердости по методу Виккерса (HV) показали, что HV образцов с толщиной плакирующего слоя 0,4 и 0,6 мм составила 190 и 191 ед., а для образцов, закаленных в холодной и горячей воде, 197 и 177 ед. соответственно. Основываясь на приведенных ранее результатах, испытания на растяжение проводили только для неплакированного образца, закаленного в холодной воде, и плакированных образцов с толщиной плакирующего слоя 0,4 и 0,6 мм. Предел прочности (σ_b) и относительное удлинение (δ) при растяжении составили: 581 МПа и 14,6 % – для образца с толщиной плакирующего слоя 0,4 мм; 581 МПа и 17,2 % – для образца с толщиной плакирующего слоя 0,6 мм; 593 и 15,7 % – для неплакированного образца, закаленного в холодной воде.

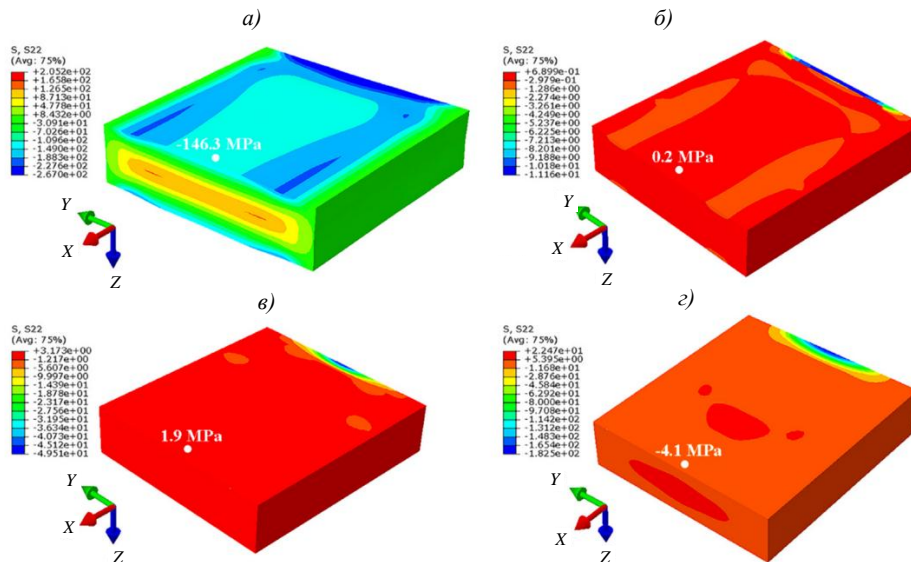


Рис. 8. Распределение остаточных напряжений в поперечном направлении образцов без покрытия, закаленных в холодной воде (а), и с плакирующим слоем толщиной 0,2 (б), 0,4 (в) и 0,6 мм (з) [25]

Таким образом, закалка с использованием плакирования оказала существенное влияние на снижение остаточных напряжений и не привела к снижению механических свойств.

Заключения

Рассмотрены различные методы снижения остаточных напряжений и коробления при закалке высокопрочных алюминиевых сплавов – закалка в водно-полимерной и криогенной средах, а также с использованием плакирования.

Установлено, что закалка в криогенной среде позволяет значительно снизить остаточные напряжения по сравнению с закалкой в холодной воде. Однако она оказывает локальный эффект, так как полностью снимает остаточные напряжения только в местах, непосредственно примыкающих к воздействию пара, а также требует дорогостоящего оборудования и уникальной оснастки для каждой конкретной геометрической формы детали, что ограничивает ее широкое распространение.

Показано, что по сравнению с обычной закалкой в холодной воде использование раствора ПАГ позволяет значительно (в ~1,5 раза) снизить остаточные напряжения и в отличие от закалки в криогенной среде обеспечивает равномерное снижение остаточных напряжений по всей площади сложноконтурных тонкостенных деталей. Однако закалка в ПАГ сопряжена с экологическими издержками, так как раствор необходимо утилизировать надлежащим образом, а гель может загрязнять поверхность деталей, в связи с чем требуется дополнительная очистка.

Малоконцентрированная закалочная среда (ПЭО (S-A) и ПАВ) обеспечивает более равномерное охлаждение образцов по сравнению с охлаждением в холодной воде, при этом снижается скорость охлаждения, что обеспечивает уменьшение коробления при сохранении требуемого уровня механических свойств. Вместе с тем закалка в малоконцентрированной среде благодаря малому содержанию полимеров – не более 2 % (по сравнению с концентрацией ПАГ: 12–40 %), обеспечивает более равномерный смыв остатков полимеров с поверхности закаленных деталей, поэтому повышается экологическая безопасность среды при ее утилизации, а также воды для промывания.

Одним из новых методов снижения остаточных напряжений в алюминиевых сплавах является закалка с использованием плакирования, при котором высокотемпературный

неорганический клей и алюминиевая фольга наносятся на поверхность детали. Снижение остаточных напряжений связано с корректировкой разности кривых охлаждения между поверхностью и серединой образцов из алюминиевого сплава 7150 и снятием поверхностных сжимающих напряжений с помощью плакирующего слоя. Однако использование данного метода представляется сложно реализуемым в условиях промышленного производства.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. № 5. С. 7–27.
2. Илларионов Э.И., Колобнев Н.И., Горбунов П.З., Каблов Е.Н. Алюминиевые сплавы в авиакосмической технике / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука, 2001. 192 с.
3. Оглодков М.С., Щетинина Н.Д., Рудченко А.С., Пантелеев М.Д. Направления развития перспективных алюминий-литиевых сплавов для авиационно-космической техники (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 19–29. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-19-29.
4. Бенариб И., Бер Л.Б., Антипов К.В., Сбитнева С.В. Тенденции развития деформируемых сплавов системы Al–Mg–Si–(Cu). Часть 1 (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 14–22. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-14-22.
5. Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Коновалов А.Н., Нефедова Ю.Н. Перспективы применения в авиационных конструкциях слоистых металлополимерных материалов на основе алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 45–53. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-45-53.
6. Антипов В.В., Григорьев М.В., Коновалов А.Н., Мешков А.А., Серебренникова Н.Ю. Изучение влияния режимов клепки на малоцикловую усталость клепаных соединений листов, изготовленных из алюминий-литиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-3-8.
7. Коптюг В.А., Фридляндер И.Н., Михайлова И.Ф. и др. Охлаждающие среды с полимерными добавками для малодеформационной закалки алюминиевых сплавов // Металловедение алюминиевых сплавов. М.: Наука, 1985. С. 55–60.
8. Moazam M.A., Honarpisheh M. Residual stress formation and distribution due to precipitation hardening and stress relieving of AA7075 // Materials Research Express. 2019. No. 6. DOI: 10.1088/2053-1591/ab59b6.
9. Koc M., Culp J., Altan T. Prediction of residual stresses in quenched aluminum blocks and their reduction through cold working processes // Journal of Materials Processing Technology. 2006. No. 174. P. 342–354. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.02.007.
10. Lin G.Y., Zhang H., Zhu W. et al. Residual stress in quenched 7075 aluminum alloy thick plates // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2003. No. 13. P. 641–644. DOI: 10.4236/msce.2021.94002.
11. Robinson J.S., Hossain S., Truman C.E. et al. Residual stress in 7449 aluminium alloy forgings // Materials Science and Engineering: A. 2010. No. 527. P. 2603–2612. DOI: 10.1016/J.MSEA.2009.12.022.
12. Robinson J.S., Tanner D.A. Residual stress development and relief in high strength aluminium alloys using standard and retrogression thermal treatments // Materials Science and Technology. 2003. No. 19. P. 512–518. DOI: 10.1179/026708303225001939.
13. Sun Y.S., Jiang F.L., Zhang H., Su J., Yuan W.H. Residual stress relief in Al–Zn–Mg–Cu alloy by a new multistage interrupted artificial aging treatment // Materials and Design. 2016. No. 92. P. 281–287. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.12.004.
14. Bates C.E., Totten G.E. Procedure for quenching media selection to maximize tensile properties and minimise distortion in aluminium-alloy parts // Heat Treatment of Metals. 1988. No. 15. P. 89–97. DOI: 10.1007/BF02831618.
15. Hilder N. Polymer quenchants – a review // Heat Treatment of Metals. 1986. No. 13. P. 15–26.
16. Hilder N. The behavior of polymer quenchants. University of Aston in Birmingham. 1988. 404 p.
17. Zhang J., Deng Y.L., Yang W. et al. Design of the multi-stage quenching process for 7050 aluminum alloy // Materials and Design. 2014. No. 56. P. 334–344. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.09.029.

18. Tanner D.A., Robinson J.S. Reducing residual stress in 2014 aluminum alloy die forgings // *Materials and Design*. 2008. No. 29. P. 1489–1496. DOI: 10.1016/j.matdes.2007.07.002.
19. Колобнев Н.И., Сенаторова О.Г. Закономерности изменения свойств при закалке // *Металловедение алюминия и его сплавов: справочник*. М.: Металлургия, 1983. С. 143–180.
20. Schimanski K. Heat Treatment and Distortion – Challenge for Aircraft Industries // *Proceedings of ICAA-12*. Bremen, 2012. P. 68–73.
21. Иванов А.Л., Сидельников В.В., Нечайкина Т.А., Козлова О.Ю. Влияние малодеформационной закалки на комплекс свойств листовых деталей из алюминиевых сплавов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2021. № 10. С. 9–15.
22. Иванов А.Л., Сенаторова О.Г., Митасов М.М., Антипов В.В., Страупенек М.Е., Тормышева Н.Ю. Кинетика охлаждения листовых деталей из алюминиевых сплавов при малодеформационной закалке в полимерной среде // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2017. № 11 (749). С. 31–36.
23. Masoudi S., Amirian Gh., Saeedi Eh., Ahmadi M. The effect of quench-induced residual stresses on the distortion of machined thin-walled parts // *Journal of materials Engineering and performance*. 2015. No. 24. P. 3933–3941. DOI: 10.1007/s11665-015-1695-7.
24. Robinson J.S., Donovan A.O., Wimpory R.C. Uphill quenching to reduce residual stress in aluminium alloy 7449 hollow structures // *Experimental mechanics*. 2022. No. 62. P. 1411–1420. DOI: 10.1007/s11340-022-00836-8.
25. Liu J., Jiang F., Tang M. et al. Reduced residual stress and retained properties in Al–Zn–Mg–Cu alloys using a novel cladding quenching process // *Journal of materials research and technology*. 2020. No. 9. P. 7201–7209. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.04.080.

References

1. Kablov E.N. Materials for aerospace engineering. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2007, no. 5, pp. 7–27.
2. Illarionov E.I., Kolobnev N.I., Gorbunov P.Z., Kablov E.N. *Aluminum alloys in aerospace engineering*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: Nauka, 2001, 192 p.
3. Oglodkov M.S., Shchetinina N.D., Rudchenko A.S., Panteleev M.D. Directions of the development of promising aluminum-lithium alloys for aerospace engineering (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 19–29. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-19-29.
4. Benarieb I., Ber L.B., Antipov K.V., Sbitneva S.V. Trends in development of wrought alloys of Al–Mg–Si–(Cu) system. Part 1 (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 14–22. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-14-22.
5. Antipov V.V., Serebrennikova N.Yu., Konovalov A.N., Nefedova Yu.N. Perspectives of application of fiber metal laminate materials based on aluminum alloys in aircraft design. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 45–53. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-45-53.
6. Antipov V.V., Grigoryev M.V., Konovalov A.N., Meshkov A.A., Serebrennikova N.Yu. Research of the influence of riveting on the low-cycle fatigue of riveted connection sheets of aluminum-lithium alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-3-8.
7. Koptyug V.A., Fridlyander I.N., Mikhailova I.F. et al. Cooling media with polymer additives for low-deformation hardening of aluminum alloys. *Metallurgy of aluminum alloys*. Moscow: Nauka, 1985, pp. 55–60.
8. Moazam M.A., Honarpisheh M. Residual stress formation and distribution due to precipitation hardening and stress relieving of AA7075. *Materials Research Express*, 2019, no. 6. DOI: 10.1088/2053-1591/ab59b6.
9. Koc M., Culp J., Altan T. Prediction of residual stresses in quenched aluminum blocks and their reduction through cold working processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, no. 174, pp. 342–354. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.02.007.
10. Lin G.Y., Zhang H., Zhu W. et al. Residual stress in quenched 7075 aluminum alloy thick plates. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2003, no. 13, pp. 641–644. DOI: 10.4236/msce.2021.94002.
11. Robinson J.S., Hossain S., Truman C.E. et al. Residual stress in 7449 aluminium alloy forgings. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, no. 527, pp. 2603–2612. DOI: 10.1016/J.MSEA.2009.12.022.

12. Robinson J.S., Tanner D.A. Residual stress development and relief in high strength aluminium alloys using standard and retrogression thermal treatments. *Materials Science and Technology*, 2003, no. 19, pp. 512–518. DOI: 10.1179/026708303225001939.
13. Sun Y.S., Jiang F.L., Zhang H., Su J., Yuan W.H. Residual stress relief in Al–Zn–Mg–Cu alloy by a new multistage interrupted artificial aging treatment. *Materials and Design*, 2016, no. 92, pp. 281–287. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.12.004.
14. Bates C.E., Totten G.E. Procedure for quenching media selection to maximize tensile properties and minimise distortion in aluminium-alloy parts. *Heat Treatment of Metals*, 1988, no. 15, pp. 89–97. DOI: 10.1007/BF02831618.
15. Hilder N. Polymer quenchant – a review. *Heat Treatment of Metals*, 1986, no. 13, pp. 15–26.
16. Hilder N. The behavior of polymer quenchant. University of Aston in Birmingham, 1988, 404 p.
17. Zhang J., Deng Y.L., Yang W. et al. Design of the multi-stage quenching process for 7050 aluminum alloy. *Materials and Design*, 2014, no. 56, pp. 334–344. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.09.029.
18. Tanner D.A., Robinson J.S. Reducing residual stress in 2014 aluminum alloy die forgings. *Materials and Design*, 2008, no. 29, pp. 1489–1496. DOI: 10.1016/j.matdes.2007.07.002.
19. Kolobnev N.I., Senatorova O.G. Patterns of changes in properties during hardening. *Metallurgy of aluminum and its alloys: a reference book*. Moscow: Metallurgiya, 1983, pp. 143–180.
20. Schimanski K. Heat Treatment and Distortion – Challenge for Aircraft Industries. *Proceedings of ICAA-12*. Bremen, 2012, pp. 68–73.
21. Ivanov A.L., Sidelnikov V.V., Nechaikina T.A., Kozlova O.Yu. Influence of low-deformation hardening on the complex of properties of sheet parts from aluminum alloys. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2021, no. 10, pp. 9–15.
22. Ivanov A.L., Senatorova O.G., Mitasov M.M., Antipov V.V., Straupenek M.E., Tormysheva N.Yu. Kinetics of cooling of sheet parts made of aluminum alloys during low-deformation hardening in a polymeric medium. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2017, no. 11 (749), pp. 31–36.
23. Masoudi S., Amirian Gh., Saeedi Eh., Ahmadi M. The effect of quench-induced residual stresses on the distortion of machined thin-walled parts. *Journal of materials Engineering and performance*, 2015, no. 24, pp. 3933–3941. DOI: 10.1007/s11665-015-1695-7.
24. Robinson J.S., Donovan A.O., Wimpory R.C. Uphill quenching to reduce residual stress in aluminium alloy 7449 hollow structures. *Experimental mechanics*, 2022, no. 62, pp. 1411–1420. DOI: 10.1007/s11340-022-00836-8.
25. Liu J., Jiang F., Tang M. et al. Reduced residual stress and retained properties in Al–Zn–Mg–Cu alloys using a novel cladding quenching process. *Journal of materials research and technology*, 2020, no. 9, pp. 7201–7209. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.04.080.

Информация об авторах

Нефедова Юлия Николаевна, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Шляпникова Татьяна Анатольевна, заместитель начальника лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Иванов Андрей Леонидович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Сидельников Василий Васильевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Yulia N. Nefedova, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Tatyana A. Shlyapnikova, Deputy Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Andrey L. Ivanov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vasily V. Sidelnikov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 10.05.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 16.05.2023.

The article was submitted 10.05.2023; approved and accepted for publication after reviewing 16.05.2023.