

УДК 53.084.823

СНИЖЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В АЛЮМИНИЕВОМ СПЛАВЕ Д16 КРИОГЕННОЙ ОБРАБОТКИ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ТЕРМОУДАРОМ

Панчо Рамирес Вильям Антонио⁽¹⁾

Магистр 2 года⁽¹⁾,

Кафедра «Материаловедение»

Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э.Баумана

Научный руководитель: Ю.А. Пучков,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение».

Аннотация

Цель работы заключается в исследовании влияния криогенной обработки и термоудара на снижение остаточных напряжений в алюминиевом сплаве Д16. После закалки образцы охлаждали в жидком азоте при температуре -196 °С в течение 5 минут, после чего быстро нагревали в горячем масле до температуры 180 °С и подвергали искусственному или естественному старению. Остаточные напряжения были определены методом сверления. На основании полученных данных было выявлено снижение уровня остаточных напряжений до 70% в обработанных образцах.

1. Введение

Алюминиевые сплавы отличаются высокой удельной прочностью, значительно превосходят стали по технологичности, в частности по обрабатываемости резанием, и по коррозионной стойкости [1]. Широко применяемым деформируемым термически упрочняемым алюминиевым сплавом является сплав Д16, легированный медью и магнием и марганцем. Закалка с последующим старением существенно упрочняет этот сплав, но может вызывать размерную нестабильность, коробление, коррозионное и усталостное разрушение, снижать предел прочности и разрушать покрытия [4]. Таким образом, в ряде случаев необходимо уменьшать остаточные напряжения в алюминиевых сплавах [2].

Когда нагретые детали опускаются в холодную воду, возникает сильный тепловой градиент. В начале охлаждения поверхностная зона охлаждается быстрее, сжимаясь вокруг центральной части заготовки, в результате чего центральная зона заготовки пластически деформируется. Сжатие малопрочной пластичной центральной зоны в последствии приводит к возникновению остаточных сжимающих напряжений в в поверхностной зоне[3].

С целью снижения остаточных напряжений вызванных закалкой необходимо правильно определять параметры закалки, в частности, выбирать охлаждающую среду и ее температуру. В качестве закалочной среды часто используют воду и минеральное масло. Высокую эффективность в качестве закалочных сред показали водные растворы полимеров, например, полиалкиленгликоль (ПАГ) [5]. В работе [6] исследовали процесс закалки в различных средах, включая воду, масло и полимерный раствор. Результаты показывают, что искажение и растрескивание по сравнению с закалкой водой были уменьшены, с другой стороны, механические свойства, недостижимые при закалке маслом, были получены при использовании закалочной среды на полимерной основе. После закалки могут использоваться и другие методы, снижающие остаточные напряжения, например, применение холодной обработки [7], низкочастотных

магнитных полей [8], электроимпульсной [9] и криогенной обработки [10], или комбинация указанных методов.

Криогенная обработка сплавов применяется для снижения остаточных напряжений в заготовках сложной формы. Данный процесс заключается в закалке сплава в холодной воде с последующим немедленным охлаждением либо сухим льдом, либо жидким азотом с последующим нагревом, чаще всего в кипящей воде или путем обработки паром высокого давления [11]. Однако, полученное снижение составило 20-40% [12], несмотря на проблемы, связанные с стоимостью и сложностью этого процесса. Поэтому целью работы является анализ эффективности криогенной обработки с последующим термоударом для значительного снижения остаточных напряжений.

2. Материалы и методика исследования

Исходным материалом для данного исследования служат кольцевые образцы с внешним диаметром 60 мм, внутренним диаметром 40 мм, шириной 10 мм (Рис. 1) изготовленные из прутков сплава Д16, химический состав которого приведен в Таблица 1.

Таблица 1. Химический состав образцов из сплава Д16

%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	Al
Min	-	-	3.8	0.3	1.2	-	-	-	-	основа
Max	0.5	0.5	4.9	0.9	1.8	0.1	0.25	0.15	0.2	

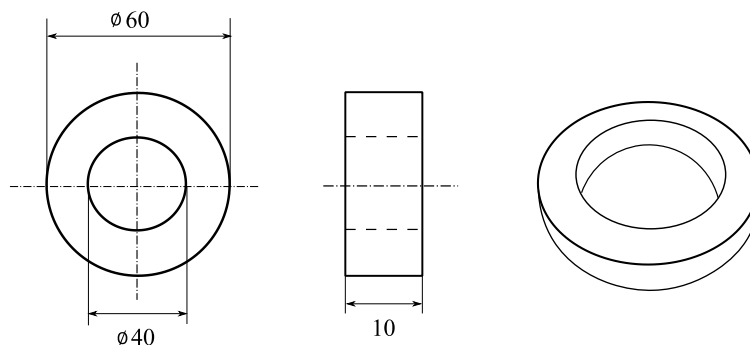


Рис. 1. Размеры образца Д16

Термическую обработку проводили в шахтных печах. Образец нагревали в соляной ванне с последующим охлаждением в воде, далее образцы погружали в жидкий азот, нагревали в масле и подвергали старению. Схема термической обработки образцов приведена в Таблице 2 и Рис. 2.

Таблица 2. Режимы термической обработки исследуемых образцов

ОБРАЗЕЦ	ЗАКАЛКА		криогенная обработка	термоудар	старение
	нагрев	охлаждение		Нагрев в масле	

К1	495°C/20 [мин]	40 °C/5 [мин]	-196/ 5 [мин]	180°C	искусственное старение 190°C/12 ч
К2	495°C/20 [мин]	40 °C/5 [мин]	-196/ [мин]	180°C	естественное старение 100 h
К3	495°C/20 [мин]	40 °C/5 [мин]	-	180°C	искусственное старение 190°C/12 ч
К4	495°C/20 [мин]	40 °C/ 5 [мин]	-	180°C	естественное старение 100 h

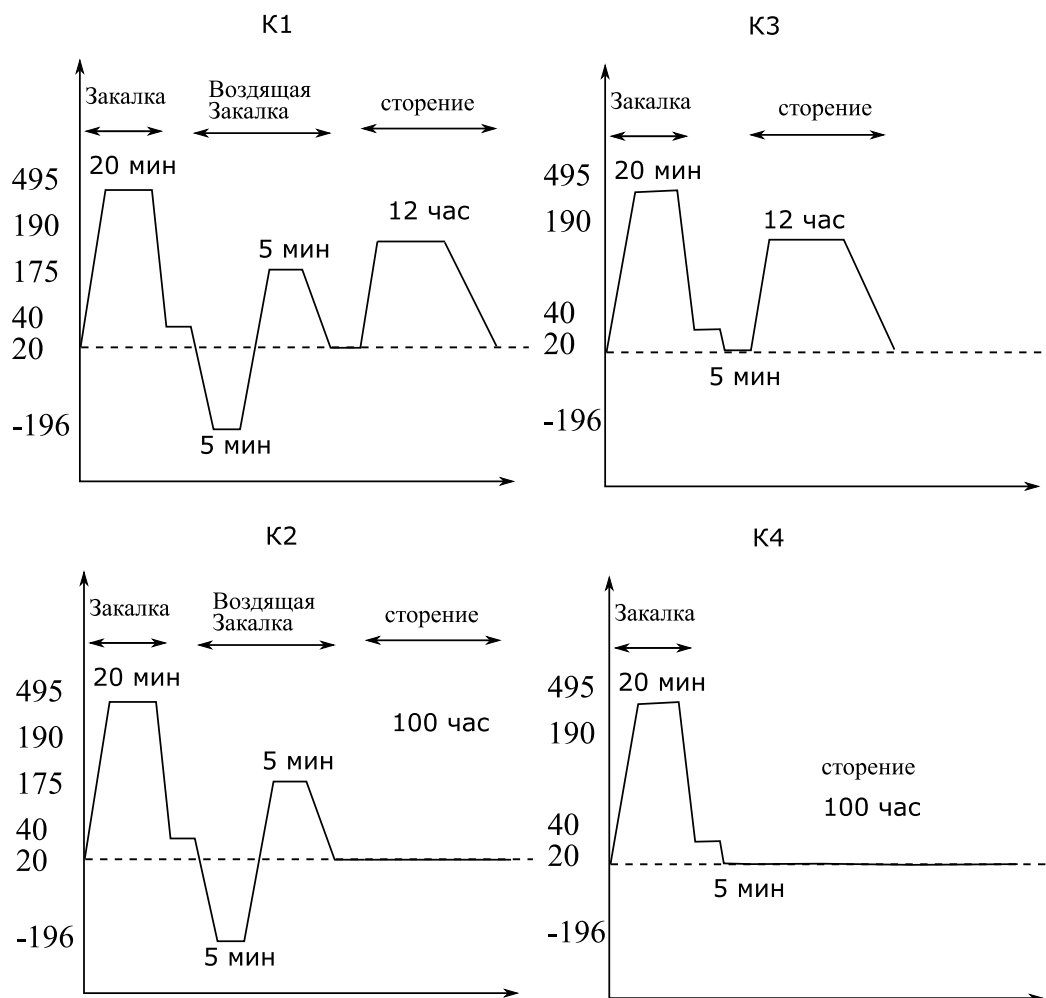


Рис. 2. Термическая обработка исследуемых образцов Д16

Определение остаточных напряжений в образцах было выполнено методом сверления согласно стандарту ASTM E837-08. Сверление перпендикулярно внешней цилиндрической поверхности на глубину 2 мм выполняли конической торцевой пальчиковой фрезой диаметром 1,8 мм.

Изучение упрочняющих фаз проводилось с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) в режиме высокого разрешения. Определение присутствующих фаз выполнили путём измерения расстояния между атомными

плоскостями исследуемой фазы. Для идентификации фаз получали изображение фазы в режиме высокого разрешения:

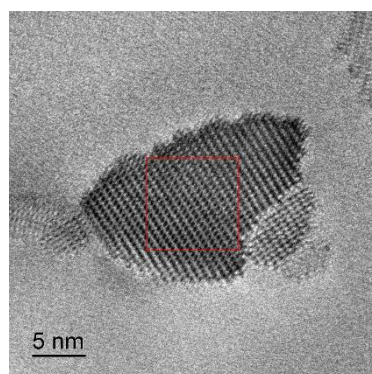


Рис. 3. Изображений упрочняющей фазы в режиме высокого разрешения

- Полученное изображение (Рис. 3) представляет собой контраст кристаллической решетки (фазовый контраст), возникающий в результате интерференции нескольких электронных волн. Для определения ориентации группы плоскостей, необходимо получить преобразование Фурье (FFT), позволяющее получить дифракционную картину.

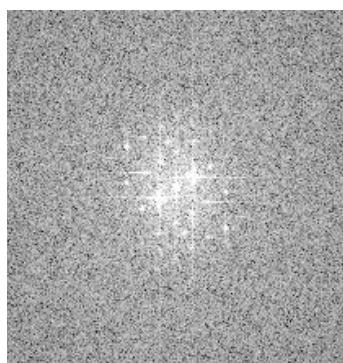


Рис. 4. Дифракционная картина исследуемой зоны.

- Каждая точка из дифракционной картина (Рис. 4) представляет собой рефлекс в обратном пространстве семьи плоскостей из реального пространства. Таким образом, выбирая рефлекс и выполняя обратное преобразование Фурье (IFFT), мы можем выделить группу плоскостей и определить расстояние между ними (Рис. 5).

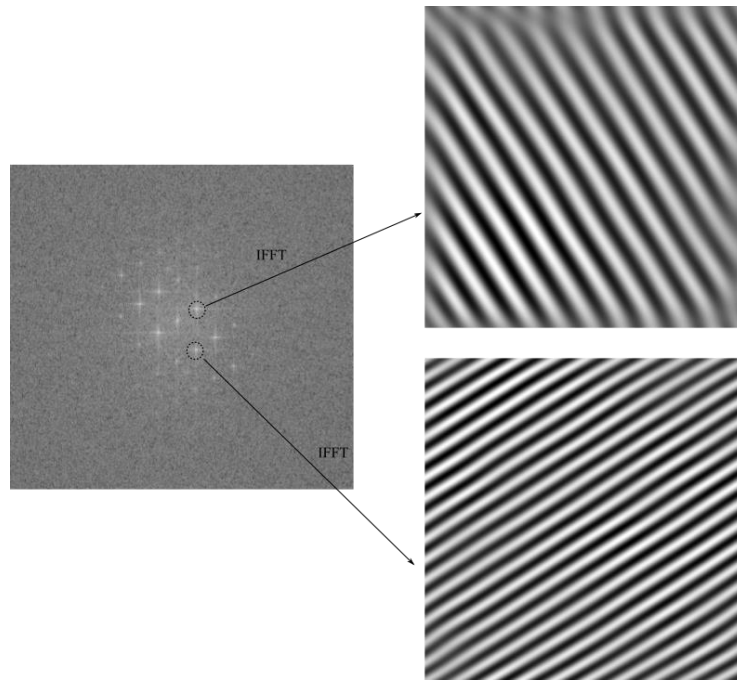


Рис. 5. Обратное преобразование Фурье (IFFT) исследуемой дифракционной картины.

- Яркие полосы представляют собой пики большей интенсивности, и расстояние между ними может быть использовано для определения расстояния между плоскостями кристаллической решетки.

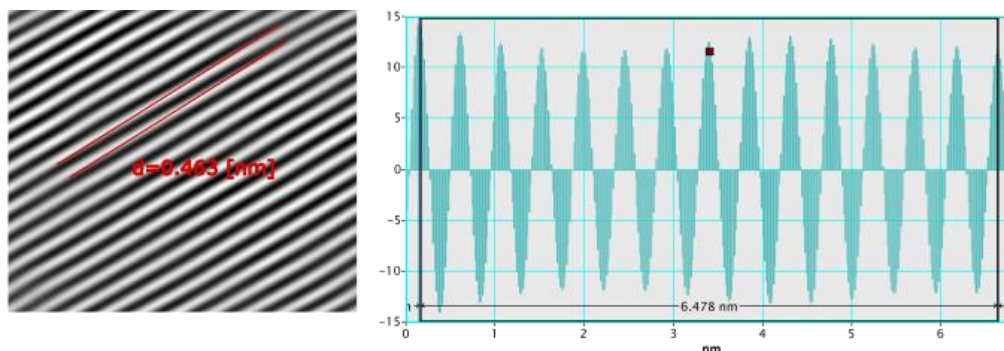


Рис. 6. Измерение расстояния между плоскостями, взяв 15 полос (6.478 [нм]) получили среднее межплоскостное расстояние 0.463 [нм].

- Это расстояние сравнивается с базой данных для идентификации фазы, в этом случае идентифицированной фазой является S-фаза.

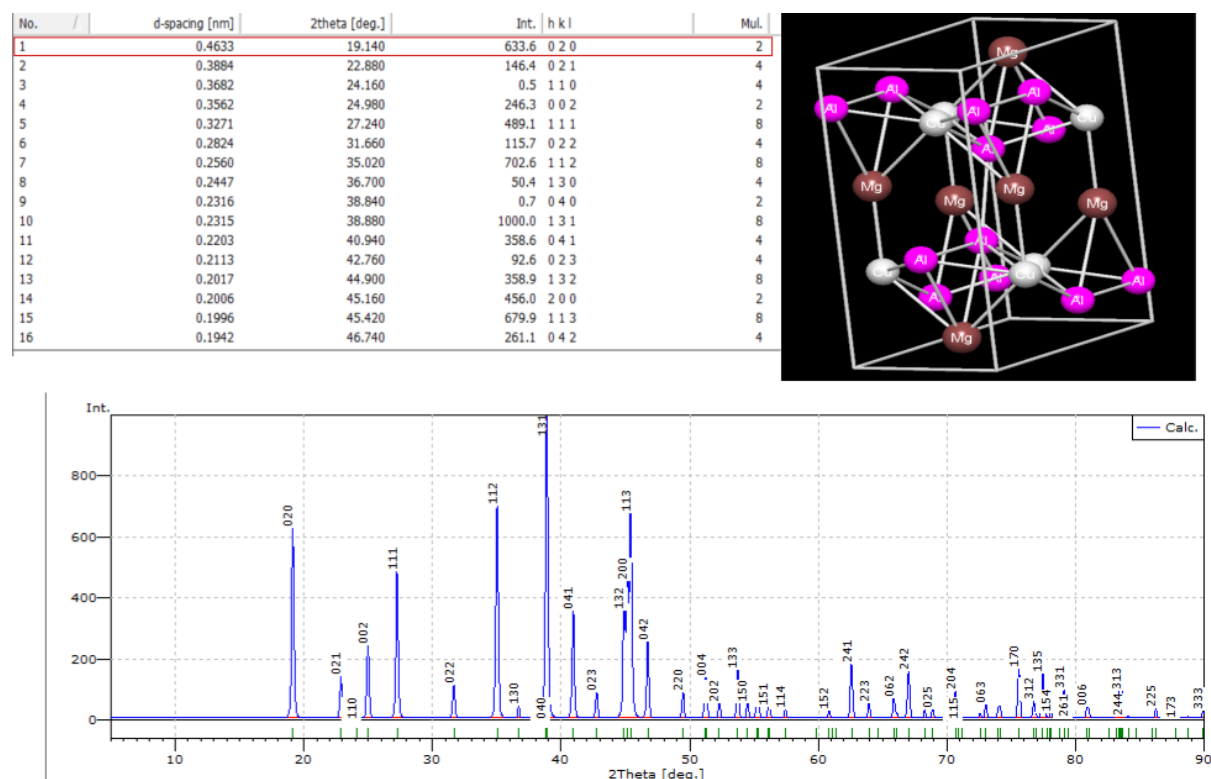


Рис. 7. Дифракционные плоскости и их соответствующие индексы Миллера для S-фазы.

3. Результаты исследования и обсуждение полученных результатов

Результаты измерения остаточных напряжений

Результаты, полученные методом сверления, представлены ниже, глубина сверления по стандарту составляла 2 мм.

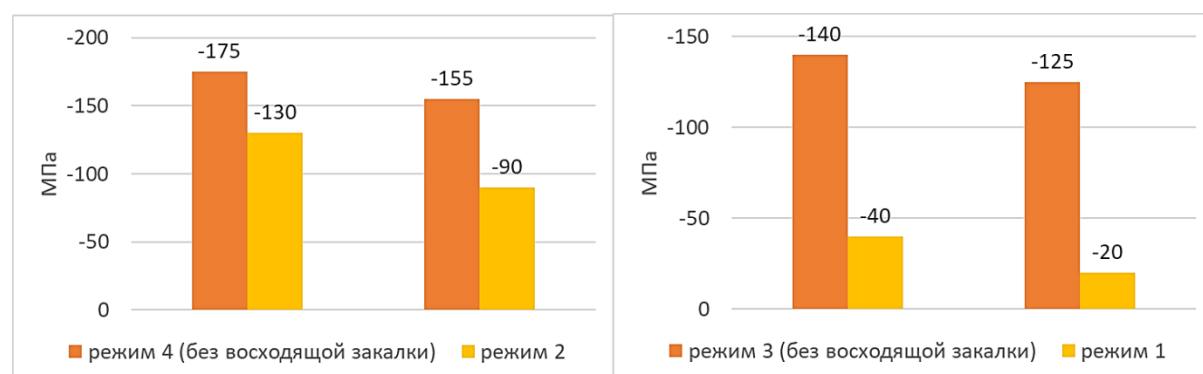


Рис. 8. Результаты измерения остаточных напряжений на цилиндрической поверхности методом сверления.

В режимах 2 (К2) и 4 (К4), подвергшихся старению при комнатной температуре (Рис.8), показано снижение остаточных напряжений от 155 до 90 [МПа], то есть приблизительно на 40%. В образцах 1 и 3, в которых старение проводилось при температуре 190°C в течение 12 часов. Результаты показывают снижение более чем на 70% (Таблица 3). Результаты согласуются с исследованием, проведенным М.Araghchi [13], В котором, проводили восходящую закалку в слове Д16, продолжающуюся два часа, в ходе которой видно, что сжимающие напряжения, возникающие при закалке,

снижаются до 70%. Полученные результаты свидетельствуют о значительном снижении остаточных напряжений при 5 мин погружение образцов в жидкий азот.

Таблица 3. Остаточные напряжения в образцах с восходящей закалкой и без неё.

	К4	К2	Разница	К3	К1	Разница
Точка	[МПа]	[МПа]	(%)	[МПа]	[МПа]	(%)
1	-175	-130	25.71	-140	-40	71.43
	-155	-90	41.94	-125	-20	84

Изображение в режиме высокого разрешения

Определение основных упрочняющих фаз предвидено путём рассмотрения и изображений в режиме высокого разрешения. Фаза S (Al_2CuMg) была обнаружена в виде округлых включений и реек.

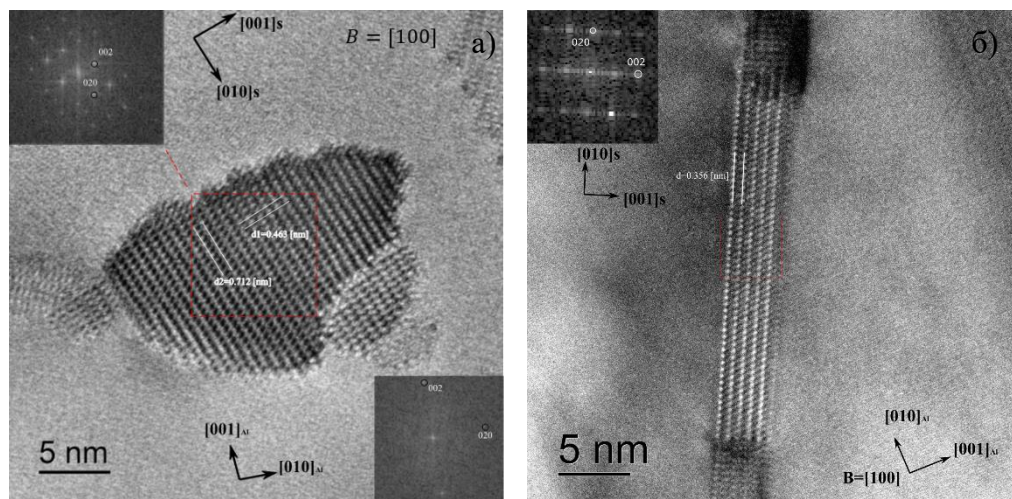


Рис. 9. а) Фаза S в образце с криогенной обработкой б) Фаза S в образце без криогенной обработки.

Во время криогенной обработки, погружение в масле вызывает пластическую деформацию в образце. Соответственно, увеличивается плотность дислокаций. При искусственном старении зарождение выделений S-фазы происходит в основном на дислокациях [14]. Поскольку пластическая деформация обеспечивает большее количество мест зарождения выделений, образующиеся выделения имеют высокую дисперсность. Отсюда следует, с помощью термоудара можно получить лучшее распределение упрочняющих фаз и уменьшение их размеров, что согласуется с результатами работы M.Araghchi [13].

Заключение

В настоящей работе применена криогенная обработка с последующим термоударом для снижения остаточных напряжений в алюминиевом сплаве Д16. После закалки в воде с последующими охлаждением в жидком азоте до -196°C и нагревом в масле до 180°C уменьшает максимальные остаточные напряжения в образцах после естественного старения со 155 до 90 МПа, т.е. на 42%, а после искусственного старения со 140 до 40 МПа, т.е. на 70%.

Погружение в азот в течение 5 минут было достаточным для получения значительного снижения остаточных напряжений.

Применение криогенной обработки и термоудара, вызывающих пластическую деформацию, позволяет получить дополнительные дислокации и большую плотность выделений упрочняющей S-фазы.

Литература

- [1] D. A. P. Reis et al., "Effect of Artificial Aging on the Mechanical Properties of an Aerospace Aluminum Alloy 2024."
- [2] M. Araghchi, H. Mansouri, R. Vafaei, and Y. Guo, "Optimization of the Mechanical Properties and Residual Stresses in 2024 Aluminum Alloy Through Heat Treatment," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 27, no. 7, pp. 3234–3238, Jul. 2018.
- [3] T. P. Earle, J. S. Robinson, and J. J. Colvin, "Investigating the mechanisms that cause quench cracking in aluminium alloy 7010," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 153–154, no. 1–3, pp. 330–337, Nov. 2004.
- [4] T. Croucher, "Minimizing machining distortion in aluminum alloys through successful application of uphill quenching - A process overview," in *ASTM Special Technical Publication*, 2010, vol. 1523 STP, pp. 332–351.
- [5] K. K. Al-Khazraji, W. A. Hanna, and O. S. Muhammed, "Study the Effect of Polymeric Quenching on Wear Resistance of Eutectic Modified Aluminium – Silicon Alloy," *J. Miner. Mater. Charact. Eng.*, vol. 10, no. 10, pp. 941–958, 2011.
- [6] M. Eshraghi-Kakhki, M. A. Golozar, and A. Kermanpur, "Application of polymeric quenchant in heat treatment of crack-sensitive steel mechanical parts: Modeling and experiments," *Mater. Des.*, vol. 32, no. 5, pp. 2870–2877, May 2011.
- [7] D. A. Tanner, J. S. Robinson, and R. L. Cudd, "Cold compression residual stress reduction in aluminum alloy 7010," *Mater. Sci. Forum*, vol. 347, pp. 235–240, 2000.
- [8] A. L. Lu, F. Tang, X. J. Luo, J. F. Mei, and H. Z. Fang, "Research on residual-stress reduction by strong pulsed magnetic treatment," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 74, no. 1–3, pp. 259–262, Feb. 1998.
- [9] S. Wu, H. Zhao, A. Lu, H. Fang, and F. Tang, "A micro-mechanism model of residual stress reduction by low frequency alternating magnetic field treatment," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 132, no. 1–3, pp. 198–202, Jan. 2003.
- [10] W. da Silva Mattos, G. E. Totten, and L. de C. F. Canale, "Uphill Quenching of Aluminum Alloys," in *Encyclopedia of Aluminum and Its Alloys*, CRC Press, 2019, p. 2757.
- [11] Q. C. Wang, L. T. Wang, and W. Peng, "Thermal Stress Relief in 7050 Aluminum Forgings by Uphill Quenching," *Mater. Sci. Forum*, vol. 490–491, pp. 97–101, Jul. 2005.
- [12] D. H. Ko, D. C. Ko, H. J. Lim, J. M. Lee, and B. M. Kim, "Prediction and measurement of relieved residual stress by the cryogenic heat treatment for Al6061 alloy: Mechanical properties and microstructure," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 27, no. 7, pp. 1949–1955, Jul. 2013.
- [13] M. Araghchi, H. Mansouri, R. Vafaei, and Y. Guo, "A novel cryogenic treatment for reduction of residual stresses in 2024 aluminum alloy," *Mater. Sci. Eng. A*, 2017.
- [14] Z. Feng, Y. Yang, B. Huang, M. Han, X. Luo, and J. Ru, "Precipitation process along dislocations in Al-Cu-Mg alloy during artificial aging," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 528, no. 2, pp. 706–714, 2010.