

ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА

**ҚАЗАҚСТАН ҒЫЛЫМЫ
МЕН ТЕХНИКАСЫ**

2001 ЖЫЛДАН БАСТАП ШЫҒАДЫ



**НАУКА И ТЕХНИКА
КАЗАХСТАНА**

ИЗДАЕТСЯ С 2001 ГОДА

ISSN 2788-8770

№ 3 (2023)

ПАВЛОДАР

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТ**
выходит 1 раз в квартал

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания
№ KZ51VPY00036165

выдано
Министерством информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

Публикация научных исследований по широкому спектру проблем
в области металлургии, машиностроения, транспорта, строительства,
химической и нефтегазовой инженерии, производства продуктов питания

Подписной индекс – 76129

<https://doi.org/10.48081/GZVJ4547>

Импакт-фактор РИНЦ – 0,189

Абишев Кайратолла Кайроллинович – к.т.н., профессор (главный редактор);
Касенов Асылбек Жумабекович – к.т.н., профессор (заместитель главного редактора);
Мусина Жанара Керейовна – к.т.н., профессор (ответственный секретарь);
Шокубаева Зауреш Жанатовна – технический редактор.

Члены редакционной коллегии:

Калиакпаров Алтай Гиндуллинович – д.т.н., профессор (Нур-Султан, Казахстан);
Клецель Марк Яковлевич – д.т.н., профессор (Павлодар, Казахстан);
Шеров Карибек Тагаевич – д.т.н., профессор (Караганда, Казахстан);
Богомолов Алексей Витальевич – к.т.н., ассоц. профессор (Павлодар, Казахстан);
Кажыбаева Галия Тулеуевна – к.т.н., профессор (Павлодар, Казахстан);

Зарубежные члены редакционной коллегии:

Waigang Sun – профессор (Пекин, Китай);
Gabriele Comodi – PhD, профессор (Анкона, Италия);
Jianhui Zhao – профессор (Харбин, Китай);
Khamid Mahkamov – д.т.н., профессор (Ньюкасл, Великобритания);
Magin Laruerta – д.т.н., профессор (СьюДад Реал, Испания);
Mareks Mezitis – д.т.н., профессор (Рига, Латвия);
Petr Bouchner – PhD, профессор (Прага, Чехия);
Ronny Berndtsson – профессор (Лунд, Швеция);
Барзов Александр Александрович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);
Витвицкий Евгений Евгеньевич – д.т.н., профессор (Омск, Россия);
Иванчина Эмилия Дмитриевна – д.т.н., профессор (Томск, Россия);
Лазарев Владислав Евгеньевич – д.т.н., профессор (Челябинск, Россия);
Мягков, Леонид Львович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);
Янюшкин Александр Сергеевич – д.т.н., профессор (Чебоксары, Россия);
Ребезов Максим Борисович – д.с/х.н., профессор (Москва, Россия).

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов
При использовании материалов журнала ссылка на журнал «Наука и техника Казахстана» обязательна

© Торайгыров университет

МРНТИ 55.09.43

<https://doi.org/10.48081/RYS1423>**Ж. А. Ашкеев¹, *М. Ж. Абишкенов², К. А. Ногаев³, А. У. Камаров⁴**^{1,2,3}Карагандинский индустриальный университет,

Республика Казахстан, г. Темиртау;

⁴Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар*e-mail: maks91.kz@inbox.ru**К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК**

Работа посвящена оптимизации состава гибридных (трехкомпонентных) алюмоматричных композитов, которые как и наиболее широко используемые в машиностроительной отрасли стальных заготовки, являются прочными, но при этом отличаются от них значительно легким весом и коррозионностойкостью. Предлагается минорная добавка (армирование) в матричный алюминий диборида титана и нанодисперсного диоксида кремния (наносилики), которые оказывают положительное влияние на такие основные механические свойства машиностроительных заготовок как прочность, пластичность, твердость, но при этом не ухудшает характерные для исходного неармированного алюминия антикоррозионные свойства и не приводит к увеличению общей массы машиностроительных заготовок. Для установления зависимости вышеуказанных показателей механических свойств (параметр оптимизации Y) гибридного алюмоматричного композита от содержания армирующих наполнителей (факторы X_1 и X_2) был проведен предварительный двухфакторный эксперимент с описанием условий его проведения и составлением матрицы планирования, карты проведения эксперимента. Определены коэффициенты регрессии, выявлена их значимость и с использованием значимых коэффициентов получена уравнение регрессии – математическая модель, которая адекватно описывает процесс получения алюмоматричного композита, а также позволяет оптимизировать расход армирующих наполнителей для обеспечения необходимого уровня прочности конечных композитов. Выявлено, что и X_1 , и X_2 значимые и существенно влияют на прочностные и другие механические свойства машиностроительной заготовки из алюмоматричного композита. Адекватность (пригодность) модели проверена критерием Фишера. Работа выполнено в рамках решения задачи по выбору перспективных весовых процентных составов алюмоматричных композитов с научной оценкой и анализом влияния выбранных армирующих материалов на структуру и свойства конечных алюмоматричных композитов посредством методов обработки первичной информации и факторного эксперимента (предварительного) в рамках проекта AP19677907

«Исследование влияния микро/наночастиц, промышленных отходов и сдвига на качество металлических заготовок для машиностроения».

Ключевые слова: алюмоматричный композит, диборид титана, наносилика, факторный эксперимент, оптимизация состава, уравнение регрессии, механические свойства, армирование.

Введение

В современном машиностроении наблюдается технологическая необходимость в легких, но при этом прочных металлических заготовках. Эту необходимость в перспективе могут удовлетворить металломатричные композиты (ММК). В отчете о мировом рынке ММК экспертами The Business Research Company в данной области за 2023 год ожидается, что объем мирового рынка ММК вырастет до 0,81 млрд долларов к 2027 году при среднегодовом темпе роста 8,6 %. На данный момент на рынке ММК в качестве матричных материалов наиболее широко используются Al, Mg, Cu, Fe, Ti. Наиболее распространенным и перспективным из них является Al, так как алюмоматричные композиты (АМК) отличаются меньшим весом, хорошей обрабатываемостью, высоком соотношении прочности к весу, превосходной коррозионной стойкостью, оптимальными и высокими значениями твердости, износостойкости и теплопроводности [1]. Другие матричные материалы имеют ряд критических недостатков, сильно ограничивающих целесообразность их применения: Mg – низкая пластичность и низкое сопротивление разрушению, повышенная реакционная способность при повышенной температуре, требующая дополнительного контроля; Fe – хрупкость и меньшая ударная вязкость по сравнению с другими композитами, применение в основном для повышения износостойкости, не подходит для применения в морской среде; Cu – низкая прочность, в основном применяется там, где нужны хорошие свойства теплопроводности и электропроводности [1]. Поэтому на сегодняшний день АМК являются крупнейшим сегментом мирового рынка ММК и имеют огромный потенциал для инженерных применений в машиностроении, аэрокосмической отрасли, электротехнике, электронике, оборонной отрасли, автомобильной и транспортной промышленности, вызывая индустриальную заинтересованность. Также преимущества в виде низкого коэффициента теплового расширения и малого веса открывают потенциальные возможности для применения АМК в робототехнике, лазерной инженерии, производстве высокоскоростных и высокоточных оборудований, где названные преимущества являются основными факторами для выбора материалов.

Для получения металлических АМК исходные матричные алюминиевые материалы (порошки алюминия, чистый алюминий, ковкие или деформируемые, литейные алюминиевые сплавы) методами инфильтрации жидким металлом, порошковой металлургии, литья, осаждения армируются различными материалами, основными из которых являются оксиды, нитриды, карбиды, бориды, сульфиды, металлы и металлоиды [1]. Предварительный аналитический обзор научно-технической литературы выявил, что все больше растет актуальность использования твердых промышленных [2–4] и сельскохозяйственных отходов

[5–7] в качестве армирующего материала, которая дает возможность вторичного использования или рециклинга таких отходов без ухудшения качества композита («зеленая технология»). Результаты имеющихся исследований, обнадеживающие с точки зрения улучшения механических свойств, что создают предпосылки для дальнейших исследований и усовершенствования. Несмотря на то, что на данный момент при производстве АМК основную долю армирующих материалов составляют микрочастицы, наблюдается интерес к использованию наночастиц, например, углеродных наноматериалов [8–10], которые могут способствовать улучшению качества конечных АМК благодаря высокому уровню модулю Юнга (~ 1 ТПа), предела прочности на растяжение (>110 ГПа), низкой плотности ($\sim 0,5 \div 2,8$ г/см³), что намного превосходят эти же параметры у микрочастиц.

Одним из основных проблем, ограничивающих в определенной мере применение ММК в качестве конструкционного материала в машиностроении остается их низкая пластичность, из-за так называемой «дилеммы прочности-пластичности» [11], которая заключается в снижении пластичности материала при одновременном увеличении его прочности и приводящий к деформационному растрескиванию, разрушению и непригодности материала. Основными причинами являются критические проблемы, связанные с локальной агломерацией частиц (неравномерность смешивания и диспергирования), плохие межфазные сцепления, специфические недостатки существующих способов получения. Данная проблема вкуче с зачастую дорогой стоимостью ММК по сравнению с традиционными материалами создает необходимость нахождения альтернативных и сравнительно недорогих технологий производства ММК. В особенности дилемма характерна методам порошковой металлургии, которые остаются основными методами получения ММК на данном этапе развития ММК. Предлагаются различные стратегии, которые в какой-то степени помогут преодолеть или решить эту дилемму. Большинство этих стратегий характерны методом порошковой металлургии и предполагают зачастую затратные и трудоемкие многоступенчатые типы решения проблем, такие как межфазное нанодекорирование [12], армирование многомасштабными и двойными структурированными частицами [13], увеличение пластичности композита микролегированием, за счет оптимизированной реакции соль-металл и многоступенчатой термообработки [14] и др. Анализ также выявил, что методам порошковой металлургии для производства АМК характерны такие недостатки как длительное время (вплоть до 20–40 часов) подготовки порошковых смесей, включая их смешивание, снижающее производительность и эффективность производства; сложность межфазного сцепления и контроля межфазной реакции, требующих принятия дополнительных мер для улучшения, например, необходимость ввода дополнительных дорогостоящих дисперсоидов, высокая энергоемкость процессов спекания и горячего прессования порошковой смеси; трудность получения изделий и заготовок больших размеров; ограниченность в объемах производства; сложность получения беспористых металлических материалов без дополнительных обработок и манипуляций; необходимость применения многоступенчатой или специальной термообработки. Эти недостатки

создают предпосылки для разработки менее затратных и производительных способов получения АМК, улучшающих межфазное сцепление, а также имеющих потенциал интеграции с действующими производствами. Предварительный анализ научно-технической литературы и состояния современного уровня техники выявил, что получение АМК методами литья привлекает внимание многих отраслей промышленности, поскольку имеют ряд преимуществ, которые заключаются в простоте, гибкости и применимости к большому объему материалов при низкочастотном производстве [1]. Также при обоснованном выборе армирующих материалов и соблюдении технологических принципов литья АМК улучшаются межфазные сцепления. Литье хорошо интегрируется с высокопроизводительными (прокатка, ковка, механическая обработка и др.) и специальными (ультразвуковая, лазерная, поверхностная, модифицирующая обработка и др.) процессами металлообработки, т.е. не требует полной реконструкции производственных цехов при внедрении в производство.

Несмотря на имеющиеся множество предложенных моделей по оптимизации АМК, среди них недостаточно моделей для определения оптимального состава самих добавок или армирующих наполнителей, обеспечивающих наилучшие сочетания механических свойств АМК. В связи с этим задача по определению оптимального состава армирующих наполнителей, обеспечивающих наилучшее сочетание механических свойств конечного АМК является актуальной задачей. С этой целью был проведен предварительный двухфакторный эксперимент [15] для установления зависимости показателей механических свойств Y (σ_b , МПа) гибридного трехкомпонентного АМК от содержания диборида титана X_1 (TiB_2 , массовый состав, г) и наносилики X_2 (SiO_2 , массовый состав, г) в 1000 г расплавленной алюминиевой матрицы.

Материалы и методы

Для оптимизации состава гибридного АМК $Al/TiB_2/SiO_2$ вначале был выбран параметр оптимизации (ПО), который должен отвечать всем поставленным требованиям.

ПО процесса получения АМК:

- обозначения параметра оптимизации: $Y = \sigma_b$;
- цель оптимизации: $Y \rightarrow$ максимизация ПО.

Далее выбраны факторы, которые оказывают наибольшее влияние на механические свойства получаемого АМК.

Факторы:

- X_1 – содержание диборида титана (TiB_2), г,
- X_2 – содержание наносилики (SiO_2), г.

Условия проведения двухфакторного эксперимента приведены в таблицах 1, 2 и 3.

Таблица 1 – Основные уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	Основной уровень	Интервал варьирования
X_1	150,0	50,0
X_2	125,0	45,0

Таблица 2 – Уровни варьирования факторов

Уровни	Факторы	
	X_1 , г	X_2 , г
Основной	150	125,0
Нижний	100	80,0
Верхний	200	170,0

После составления матрицы планирования проводится эксперимент на выбранном объекте исследования. Опыты проводятся в случайном порядке в соответствии с принципом рандомизации. Первым реализован опыт с порядковым номером 4, в котором факторы поддерживались на верхнем уровне. При этом получена максимальное значение предела прочности АМК (510 МПа), вторым реализован опыт номер 1, в котором оба фактора X_1 и X_2 поддерживались на нижних уровнях, а предел прочности составил 440 МПа, и т.д.

Таблица 3 – Матрица планирования и карта проведения эксперимента

Номер опыта	Порядок реализации опытов по рандомизации (две серии)	Матрица планирования		X_1 X_2	Выход (ПО), МПа		
		X_1	X_2		Y_{u1}	Y_{u2}	\bar{Y}_u
1	2; 3	-1	-1	+1	450	430	440
2	3; 1	+1	-1	-1	470	490	480
3	4; 4	-1	+1	-1	460	480	470
4	1; 2	+1	+1	+1	500	520	510

Таким образом, после проведения двух серии опытов (в каждом по четыре опыта с неповторяющимися комбинациями уровней факторов) оказались заполненными столбцы значений выхода Y_{u1} и Y_{u2} . Теперь есть все необходимое для обработки и статистического анализа результатов эксперимента [15].

Расчет построчных средних проведен по уравнению (1):

$$\bar{Y}_u = \frac{Y_{u1} + Y_{u2} + \dots + Y_{u\gamma}}{\gamma}, \quad (1)$$

где $\gamma = 2$ – число повторных опытов.

С помощью уравнения (2) определены построчные дисперсии (дисперсии воспроизводимости):

$$S_u^2 = \frac{\sum_{m=1}^{\gamma} (\bar{Y}_u - Y_{um})^2}{\gamma - 1}. \quad (2)$$

По (3) определена сумма построчных дисперсий:

$$S_{\Sigma}^2 = \sum_{u=1}^N S_u^2. \quad (3)$$

Выполнена проверка воспроизводимости опытов по критерию Кохрена:

$$G = \frac{S_{u\max}^2}{S_{\Sigma}^2}. \quad (4)$$

Опыты равномерны если $G < GT$, где GT – табличное значение критерия Кохрена, выбираемое в зависимости от N , γ и уровня значимости (надежности) p . Для данного случая при $N = 4$, $\gamma = 2$, $p = 0,95$ табличное значение $GT = 0,95$. В случае неравноточности опытов необходимо увеличить число повторных экспериментов или повысить их точность.

Определены коэффициенты уравнения регрессии:

$$b = \frac{\sum_{u=1}^N \bar{Y}_u}{N}, \quad (5)$$

$$b_0 = \frac{\bar{Y}_1 + \bar{Y}_2 + \bar{Y}_3 + \bar{Y}_4}{4}, \quad (5a)$$

$$b_1 = \frac{-\bar{Y}_1 + \bar{Y}_2 - \bar{Y}_3 + \bar{Y}_4}{4}, \quad (5б)$$

$$b_2 = \frac{-\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2 + \bar{Y}_3 + \bar{Y}_4}{4}, \quad (5в)$$

$$b_{12} = \frac{\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2 - \bar{Y}_3 + \bar{Y}_4}{4}. \quad (5г)$$

Далее проверяется значимость коэффициентов регрессии. Для этого по (6) определены дисперсия воспроизводимости

$$S_Y^2 = \frac{\sum_{u=1}^N \sum_{m=1}^{\gamma} (\bar{Y}_u - y_{um})^2}{N(\gamma - 1)} = \frac{\sum_{u=1}^N S_u^2}{N}, \quad (6)$$

а также по (7) усредненная дисперсия эксперимента с учетом повторных опытов:

$$S_{\bar{Y}}^2 = \frac{|S_{\bar{Y}}^2|}{|\gamma|}. \quad (7)$$

Определяются дисперсия и средняя квадратическая ошибка коэффициентов регрессии $S_{b_i}^2$ и S_{b_i} :

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_{\bar{Y}}^2}{N}. \quad (8a)$$

$$S_{b_i} = \sqrt{S_{b_i}^2} \quad (8б)$$

Находят значение доверительного интервала для коэффициентов регрессии:

$$\Delta b_i = \pm t \cdot S_{b_i}, \quad (9)$$

где t – табличное значение критерия Стьюдента, которое выбирается в зависимости от числа степеней свободы $f_2 = N(\gamma-1)$ и выбранного уровня значимости (обычно 0,05). Коэффициент значим, если его абсолютное значение больше доверительного интервала, т.е. коэффициент должен быть больше ошибки его определения, взятой с определенным запасом. Полученные коэффициенты сравнивают с доверительным интервалом и по результатам сравнения записывается окончательное уравнение регрессии.

Далее проверена адекватность (пригодность) модели критерием Фишера F :

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_{\bar{Y}}^2} \quad (10)$$

где $S_{ад}^2$ – дисперсия адекватности, которая определяется по (11):

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N (\hat{Y}_u - \bar{Y}_u)^2}{N - k - 1} \quad (11)$$

где \hat{Y} – рассчитанные по полученному уравнению значения выхода при значениях кодированных переменных, соответствующих каждой из строк матрицы планирования; \bar{Y} – усредненное значение выхода (параметра оптимизации), полученное при реализации повторных опытов для соответствующей строки (комбинации значений факторов матрицы планирования). Модель можно считать адекватной, если $F < F_{табл}$. Табличное значение критерия Фишера находят в зависимости от числа степеней свободы $f_1 = N-k-1$ и $f_2 = N(\gamma-1)$, которые численно равны знаменателям соответствующих дисперсии $S_{ад}^2$ и $S_{\bar{Y}}^2$, и уровня значимости (чаще всего 0,05). Здесь N – число вариантов опытов (строк) в матрице планирования; k – число варьируемых факторов; γ – число повторных (параллельных) опытов.

Для определения $S_{ад}^2$ по полученному уравнению регрессии вычислены значения выхода. Для удобства расчетов $S_{ад}^2$ рядом сопоставлены усредненные опытные значения для тех же условий.

Результаты и обсуждения

Результаты расчета построчных средних по (1):

$$\bar{Y}_1 = \frac{450 + 430}{2} = 440 \text{ МПа,}$$

$$\bar{Y}_2 = \frac{470 + 490}{2} = 480 \text{ МПа,}$$

$$\bar{Y}_3 = \frac{460 + 480}{2} = 470 \text{ МПа,}$$

$$\bar{Y}_4 = \frac{500 + 520}{2} = 510 \text{ МПа.}$$

Результаты расчета занесены в столбец \bar{Y}_i таблицы 2.

Результаты расчета построчных дисперсий по (2):

$$S_1^2 = \frac{(440 - 450)^2 + (440 - 430)^2}{2 - 1} = 200,$$

$$S_2^2 = \frac{(480 - 470)^2 + (480 - 490)^2}{2 - 1} = 200,$$

$$S_3^2 = \frac{(470 - 460)^2 + (470 - 480)^2}{2 - 1} = 200,$$

$$S_4^2 = \frac{(510 - 500)^2 + (510 - 520)^2}{2 - 1} = 200.$$

Сумма построчных дисперсий по (3):

$$S_{\Sigma}^2 = 200 + 200 + 200 + 200 = 800.$$

Проверка воспроизводимости опытов по критерию Кохрена:

$$G = \frac{200}{800} = 0,25 < G_T.$$

Значит опыты равномерны.

Результаты расчета коэффициентов уравнения регрессии по формулам (5а–г):

$$b_0 = \frac{440 + 480 + 470 + 510}{4} = 475,$$

$$b_1 = \frac{-440 + 480 - 470 + 510}{4} = 20,$$

$$b_2 = \frac{-440 - 480 + 470 + 510}{4} = 15,$$

$$b_{12} = \frac{440 - 480 - 470 + 510}{4} = 0.$$

Дисперсия воспроизводимости по (6):

$$S_Y^2 = \frac{800}{4} = 200.$$

Усредненная дисперсия эксперимента по (7):

$$S_{\bar{Y}}^2 = \frac{200}{2} = 100.$$

Дисперсия и средняя квадратическая ошибка коэффициентов регрессии по (8а) и (8б):

$$S_{b_i}^2 = \frac{100}{4} = 25,$$

$$S_{b_i} = \sqrt{25} = 5.$$

При $f_2 = 4(2-1)$ значение $t = 2,78$. Тогда значение доверительного интервала для коэффициентов регрессии по (9):

$$\Delta b_i = \pm 2,78 \cdot 5 = 13,9.$$

Сравнение полученных по формулам (5а–г) коэффициентов с доверительным интервалом Δb_i для выявления их значимости: $b_0 > \Delta b_i$ (значим); $b_1 > \Delta b_i$ (значим); $b_2 > \Delta b_i$ (значим); $b_{12} < \Delta b_i$ (не значим).

Включив все коэффициенты регрессии, которые оказались значимыми, окончательно записывается уравнение регрессии:

$$Y = 475 + 20X_1 + 15X_2.$$

Ниже представлены значения выхода, предсказываемые уравнением регрессии (12) и усредненные опытные значения по (1) для сопоставления:

Значения выхода, предсказываемые (12)	Значения по (1)
$\hat{Y}_1 = 475 + 20,0(-1) + 15,0(-1) = 440$	$\bar{Y} = 440$
$\hat{Y}_2 = 475,0 + 20,0(+1) + 15,0(-1) = 480$	$\bar{Y} = 480$
$\hat{Y}_3 = 475,0 + 20,0(-1) + 15,0(+1) = 470$	$\bar{Y} = 470$
$\hat{Y}_4 = 475,0 + 20,0(+1) + 15,0(+1) = 510$	$\bar{Y} = 510$

Дисперсия адекватности или остаточная дисперсия по (11):

$$S_{ад}^2 = \frac{(440 - 440)^2 + (480 - 480)^2 + (470 - 470)^2 + (510 - 510)^2}{4 - 2 - 1} = 0,0.$$

Значение критерия Фишера по (10):

$$F = \frac{0,0}{100} = 0,0.$$

При $f_1 = N - k - 1 = 4 - 2 - 1 = 1$ и $f_2 = 4$ табличное значение критерия Фишера $F_{табл} = 7,7$. Тогда $F < F_{табл}$, т.е. имеется основание сделать вывод об адекватности полученной модели.

Выводы

Получена идеальная адекватная математическая модель, которая в точь-в-точь описывает процесс получения легких и коррозионноустойчивых АМК для производства машиностроительных заготовок, и позволяет оптимизировать расход армирующих наполнителей в матричном материале алюминия для обеспечения необходимой прочности, пластичности и твердости конечных АМК. На первом этапе наиболее оптимальным вариантом можно считать опыт №4, где максимальное значение предела прочности АМК обеспечивается при добавлении 200 г диборида титана и 170 г наносилики на 1000 г матричного материала. Отсюда, полученную математическую модель можно использовать как базу для оптимизации состава АМК с целью обеспечения необходимых механических свойств заготовки, а значит и деталей машин из таких заготовок, при других значениях факторов. По полученной модели можно сделать вывод, что оба фактора значимые и существенно влияют на механические свойства АМК.

Информация о финансировании

Данная работа выполнена в рамках исследования, финансируемого Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP19677907).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Ramanathan, A., Krishnan, P. K., Muraliraja, R.** A review on the production of metal matrix composites through stir casting – Furnace design, properties, challenges, and research opportunities // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2019. – Vol. 42. – P. 213–245.

2 **Panwar, N., Chauhan, A.** Parametric behaviour optimisation of macro and micro hardness for heat treated Al 6061-red mud composite // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2018. – Vol. 8(1). – P. 660–669.

3 **Rao, R. G., Ghosh, M., Ganguly, R. I., Bose P. S. C., Sahoo, K. L.** Mechanical properties and age hardening response of Al6061 alloy based composites reinforced with fly ash // *Materials Science and Engineering: A*. – 2020. – Vol. 772. – P. 138823.

4 **Pragathi, P., Elansezhian, R.** Studies on microstructural and mechanical properties of (Nano SiC + Waste Spent catalyst) reinforced aluminum matrix composites // *Materials Today Communications*. – 2022. – Vol. 30. – P. 103204.

5 **Alaneme, K. K., Bodunrin, M. O., Awe, A. A.** Microstructure, mechanical and fracture properties of groundnut shell ash and silicon carbide dispersion strengthened aluminium matrix composites // *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*. – 2018. – Vol. 30(1). – P. 96–103.

6 **Alaneme, K. K., Adewale, T. M., Olubambi, P. A.** Corrosion and wear behaviour of Al–Mg–Si alloy matrix hybrid composites reinforced with rice husk ash and silicon carbide // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2014. – Vol. 3(1). – P. 9–16.

7 **Aigbodion, V. S.** Bean pod ash nanoparticles a promising reinforcement for aluminium matrix biocomposites // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2019. – Vol. 8(6). – P. 6011–6020.

8 **Xu, Z. Y., Li, C. J., Gao, P., You, X., Bao, R., Fang, D., Tao, J. M., Yi, J. H.** Improving the mechanical properties of carbon nanotubes reinforced aluminum matrix composites by heterogeneous structural design // *Composites Communications*. – 2022. – Vol. 29. – P. 101050.

9 **Zhang, X., Hou, X., Pan, D., Pan, B., Liu, L., Chen, B., Kondoh, K., Li, S.** Designable interfacial structure and its influence on interface reaction and performance of MWCNTs reinforced aluminum matrix composites // *Materials Science and Engineering: A*. – 2020. – Vol. 793. – P. 139783.

10 **Hasan, M. S., Wong, T., Rohatgi, P. K., Nosonovsky, M.** Analysis of the friction and wear of graphene reinforced aluminum metal matrix composites using machine learning models // *Tribology International*. – 2022. – Vol. 170. – P. 107527.

11 **Ma, Y., Chen, H., Zhang, M.-X., Addad, A., Kong, Y., Lezaack, M. B., Gan, W., Chen, Z. Ji, G.** Break through the strength-ductility trade-off dilemma in aluminum matrix composites via precipitation-assisted interface tailoring // *Acta Materialia*. – 2023. – Vol. 242. – P. 118470.

12 **Guo, B., Chen, Y., Wang, Z., Yi, J., Ni, S., Du, Y., Li, W., Song, M.** Enhancement of strength and ductility by interfacial nano-decoration in carbon nanotube/aluminum matrix composites // *Carbon*. – 2020. – Vol. 159. – P. 201–212.

13 **Zhang, X., Lu, W., Chen, T.** Multiscale and dual-structured reinforcing particulates enhance the strength of aluminum matrix composites at no ductility loss // *Materials Science and Engineering A*. – 2022. – Vol. 856. – P. 144003.

14 **Xue, Y., Hao, Q., Li, X., Zhang, H., Wang, P., Yin, C., Li, B., Wang, X.** (2022). Acquiring Mg-Ag microalloying TiB₂/Al-4.5 Cu composite simultaneously with ultrahigh strength and ductility via optimized salt-metal reaction and multistage heat treatment // *Materials and Design*. – 2022. – Vol. 223. – P. 111252.

15 **Wu, C. F. J., Hamada, M. S.** *Experiments : Planning, Analysis, and Optimization*. Wiley, 2009. – 743 p.

REFERENCES

1 **Ramanathan, A., Krishnan, P. K., Muraliraja, R.** A review on the production of metal matrix composites through stir casting – Furnace design, properties, challenges, and research opportunities // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2019. – Vol. 42. – P. 213–245.

2 **Panwar, N., Chauhan, A.** Parametric behaviour optimisation of macro and micro hardness for heat treated Al 6061-red mud composite // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2018. – Vol. 8(1). – P. 660–669.

3 **Rao, R. G., Ghosh, M., Ganguly, R. I., Bose P. S. C., Sahoo, K. L.** Mechanical properties and age hardening response of Al6061 alloy based composites reinforced with fly ash // *Materials Science and Engineering: A*. – 2020. – Vol. 772. – P. 138823.

4 **Pragathi, P., Elansezhian, R.** Studies on microstructural and mechanical properties of (Nano SiC + Waste Spent catalyst) reinforced aluminum matrix composites // *Materials Today Communications*. – 2022. – Vol. 30. – P. 103204.

5 **Alaneme, K. K., Bodunrin, M. O., Awe, A. A.** Microstructure, mechanical and fracture properties of groundnut shell ash and silicon carbide dispersion strengthened aluminium matrix composites // *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. – 2018. – Vol. 30(1). – P. 96–103.

6 **Alaneme, K. K., Adewale, T. M., Olubambi, P. A.** Corrosion and wear behaviour of Al–Mg–Si alloy matrix hybrid composites reinforced with rice husk ash and silicon carbide // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2014. – Vol. 3(1). – P. 9–16.

7 **Aigbodion, V. S.** Bean pod ash nanoparticles a promising reinforcement for aluminium matrix biocomposites // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2019. – Vol. 8(6). – P. 6011–6020.

8 **Xu, Z.Y., Li, C.J., Gao, P., You, X., Bao, R., Fang, D., Tao, J.M., Yi, J. H.** Improving the mechanical properties of carbon nanotubes reinforced aluminum matrix composites by heterogeneous structural design // *Composites Communications*. – 2022. – Vol. 29. – P. 101050.

9 **Zhang, X., Hou, X., Pan, D., Pan, B., Liu, L., Chen, B., Kondoh, K., Li, S.** Designable interfacial structure and its influence on interface reaction and performance of MWCNTs reinforced aluminum matrix composites // *Materials Science and Engineering: A*. – 2020. – Vol. 793. – P. 139783.

10 Hasan, M.S., Wong, T., Rohatgi, P. K., Nosonovsky, M. Analysis of the friction and wear of graphene reinforced aluminum metal matrix composites using machine learning models // Tribology International. – 2022. – Vol. 170. – P. 107527.

11 Ma, Y., Chen, H., Zhang, M.-X., Addad, A., Kong, Y., Lezaack, M. B., Gan, W., Chen, Z. Ji, G. Break through the strength-ductility trade-off dilemma in aluminum matrix composites via precipitation-assisted interface tailoring // Acta Materialia. – 2023. – Vol. 242. – P. 118470.

12 Guo, B., Chen, Y., Wang, Z., Yi, J., Ni, S., Du, Y., Li, W., Song, M. Enhancement of strength and ductility by interfacial nano-decoration in carbon nanotube/aluminum matrix composites // Carbon. – 2020. – Vol. 159. – P. 201–212.

13 Zhang, X., Lu, W., Chen, T. Multiscale and dual-structured reinforcing particulates enhance the strength of aluminum matrix composites at no ductility loss // Materials Science and Engineering A. – 2022. – Vol. 856. – P. 144003.

14 Xue, Y., Hao, Q., Li, X., Zhang, H., Wang, P., Yin, C., Li, B., Wang, X. (2022). Acquiring Mg-Ag microalloying TiB₂/Al-4.5Cu composite simultaneously with ultrahigh strength and ductility via optimized salt-metal reaction and multistage heat treatment // Materials and Design. – 2022. – Vol. 223. – P. 111252.

15 Wu, C. F. J., Hamada, M. S. Experiments: Planning, Analysis, and Optimization. Wiley, 2009. – 743 p.

Материал поступил в редакцию 18.08.23.

*Ж. А. Ашкеев¹, *М. Ж. Абишкенов², К. А. Ногаев³, А. У. Камаров⁴*

^{1,2,3}Қарағанды индустриялық университеті,

Қазақстан Республикасы, Теміртау қ.;

⁴Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

Материал 18.08.23 баспаға түсті.

МАШИНА ЖАСАУ ДАЙЫНДАМАЛАРЫН ӨНДІРУГЕ АРНАЛҒАН ГИБРИДТІ АЛЮМОМАТРИЦАЛЫҚ КОМПОЗИТТЕРДІҢ ОҢТАЙЛЫ ҚҰРАМЫН АНЫҚТАУ МӘСЕЛЕСІ ТУРАЛЫ

Жұмыс машина жасау саласында кеңінен қолданылатын болат дайындамалар сияқты берік, бірақ олардан айтарлықтай жеңіл салмақпен және коррозияға төзімділігімен ерекшеленетін гибриді (үшкомпонентті) алюмоматрицалық композиттердің құрамын оңтайландыруға арналған. Машина жасау дайындамаларының беріктік, пластикалық, қаттылық сияқты негізгі механикалық қасиеттеріне оң әсер ететіндей, бірақ сонымен бірге бастапқы армирленбеген алюминийге тән антикоррозиялық қасиеттерді нашарлатпайтындай және машина жасау дайындамаларының жалпы массасының ұлғаюына әкелмейтіндей етіп матрицалық алюминийді титан диборидімен және нанодисперсті кремний диоксидімен (наносилика) аз мөлшерде минорлы армирлеу немесе күшейту ұсынылады. Гибриді алюмоматрицалық композиттің механикалық қасиеттері көрсеткіштерінің (оңтайландыру параметрі Y) армирлеуші толтырғыштардың құрамына

(X_1 және X_2 факторлары) тәуелділігін анықтау үшін оның шарттарын сипаттай отырып, сондай-ақ жоспарлау матрицасын және эксперимент картасын құрастырумен бірге бастапқы екіфакторлы эксперимент жүргізілді. Регрессия коэффициенттері анықталды, олардың маңыздылығы айқындалды және маңызды коэффициенттерді пайдалана отырып регрессия теңдеуі – алюмоматрицалық композитті алу үрдісін адекватты түрде сипаттай алатын, сонымен қатар алынатын соңғы композиттің механикалық сипаттамаларының қажетті деңгейін қамтамасыз ету үшін армирлеуші толтырғыштардың шығынын оңтайландыруға мүмкіндік беретін математикалық модель алынды. X_1 де, X_2 де маңызды және алюмоматрицалық композиттерден жасалған машина жасау дайындамаларының беріктігіне және басқа да механикалық қасиеттеріне айтарлықтай әсер ететіндігі анықталды. Модельдің адекваттылығы (жарамдылығы) Фишер критерийі бойынша тексерілді. Жұмыс АР19677907 «Микро/нанобөлшектердің, өндірістік қалдықтардың және ығысудың машина жасауда қолданылатын металл дайындамалар сапасына тигізетін әсерін зерттеу» тақырыбындағы гранттық жобаның бастапқы ақпаратты өңдеу және бастапқы факторлық эксперимент әдістерін қолдана отырып, соңғы алюмоматрицалық композиттердің құрылымы мен қасиеттеріне таңдалған армирлеуші материалдардың әсерін ғылыми бағалау және талдау арқылы алюминий матрицалық композиттердің перспективті салмақтық пайыздық құрамдарын таңдау міндетін шешу шеңберінде жүргізілді.

Кілтті сөздер: алюмоматрицалық композит, титан дибориді, наносилика, факторлық эксперимент, құрамды оңтайландыру, регрессия теңдеуі, механикалық қасиеттер, армирлеу.

Zh. A. Ashkeyev¹, *M. Zh. Abishkenov², K. A. Nogaev³, A. U. Kamarov⁴

^{1,2,3}Karaganda Industrial University, Republic of Kazakhstan, Temirtau;

⁴Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

Material received on 08.08.23.

ON OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION OF A HYBRID ALUMINUM MATRIX COMPOSITE FOR BILLET PRODUCTION

The work is devoted to optimizing the composition of hybrid (three-component) aluminum matrix composites, which, like the most widely used steel blanks in the engineering industry, are strong, but at the same time differ from them in significantly lighter weight and corrosion resistance. A minor addition (reinforcement) to matrix aluminum of titanium diboride and silicon dioxide nanopowder (nanosilica) is proposed, which have a positive effect on such basic mechanical properties of machine parts blanks as strength, ductility, hardness, but at the same time do not worsen the anticorrosion properties characteristic of the original unreinforced aluminum and does not lead to an increase in the total mass of machine parts blanks. To identify the dependence of mechanical properties (optimization parameter Y) of the hybrid aluminum matrix composite on the content of reinforcing particles (factors X_1 and X_2), a preliminary factorial experiment was carried out with the description of

the conditions of its implementation and the compilation of the planning matrix and the table of the experiment. Regression coefficients are determined, their significance is revealed and using significant coefficients the regression equation - mathematical model is obtained, which adequately describes the process of obtaining aluminum matrix composite, and also allows to optimize the flow rate of reinforcing particles to ensure the required level of mechanical properties of final composites. It was found that both X_1 and X_2 are significant and significantly affect the strength and other mechanical properties of the mechanical engineering billet of the aluminum matrix composite. The adequacy (fitness) of the model was checked by the Fisher criterion. The work was carried out within the framework of solving the problem of selecting promising weight percent compositions of aluminum matrix composites with scientific evaluation and analysis of the influence of selected reinforcing materials on the structure and properties of final aluminum matrix composites by means of methods of primary information processing and factorial experiment (preliminary) within the framework of the project AP19677907 «Study of the influence of micro/nanoparticles, industrial waste and shear on the quality of metal blanks for mechanical engineering».

Keywords: aluminum matrix composite, titanium diboride, nanosilica, factorial experiment, composition optimization, regression equation, mechanical properties, reinforcement.

Теруге 08.09.23 ж. жіберілді. Басуға 29.09.23 ж. қол қойылды.

Электрондық баспа

5,07 Mb RAM

Шартты баспа табағы 17,61 Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: Е. Е. Калихан

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4133

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов көш., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

e-mail: kereku@tou.edu.kz

nitk.tou.edu.kz