



## Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



### Исследование характера изменения твердости композиционных материалов с алюминиевой матрицей, упрочненной золой кокосовой скорлупы и красным шламом, с использованием анализа Тагучи

Риши Деванган<sup>1, а</sup>, Бхупендра Шарма<sup>2, б</sup>, Шиам Шарма<sup>3, с, \*</sup>

<sup>1</sup> Университет Амита, Раджастхан, Джайпур, 303002, Индия

<sup>2</sup> Университет Амита, Уттар-Прадеш, Нойда, 201313, Индия

<sup>3</sup> Манипалский университет, Джайпур, Джайпур, 303007, Индия

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1973-6726>, [rdewangan@jpr.amity.edu](mailto:rdewangan@jpr.amity.edu); <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3207-7286>, [bpsharma@amity.edu](mailto:bpsharma@amity.edu);

<sup>с</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1510-5871>, [shyamsunder.sharma@jaipur.manipal.edu](mailto:shyamsunder.sharma@jaipur.manipal.edu)

#### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 671.22

#### История статьи:

Поступила: 14 апреля 2024

Рецензирование: 17 мая 2024

Принята к печати: 22 июня 2024

Доступно онлайн: 15 сентября 2024

#### Ключевые слова:

Дисперсионный анализ (ANOVA)

Зола кокосовой скорлупы

Твердость

Красный шлам

#### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В настоящее время широко используются легкие и высокопрочные алюмоматричные композиты из-за их высоких механических и трибологических свойств. Алюмоматричный композит, армированный керамикой и промышленными отходами, способен изменять свое механико-химическое поведение. **Цель работы:** создать алюмоматричный композиционный материал с использованием керамических (первичных) и промышленных (вторичных) отходов, представленных красным шламом и золой скорлупы кокосового ореха соответственно. Массовая доля упрочняющей фазы варьировалась от 5 до 12,5 масс. % соответственно с остаточным массовым процентом алюминиевого сплава. **Метод исследования.** Методом литья с перемешиванием были приготовлены девять образцов композиционных материалов. Перемешивание осуществляли со скоростью от 50 до 100 об/мин в течение 20 минут при температуре 800 °С. **Результаты и обсуждение.** Твердость алюмоматричного композита исследовали при нагрузке на индентор 10, 15 и 20 кН. Для проведения дисперсионного (ANOVA) анализа и регрессионного анализа путем выбора массового процента красного шлама и массового процента золы из скорлупы кокосового ореха был выбран метод Тагучи с ортогональным массивом L27. В качестве входного параметра использовали нагрузку на индентор, а в качестве выходного параметра – характер изменения твердости. Были исследованы отношение сигнал/помеха, таблица откликов, контурная диаграмма и график нормальной вероятности, и обнаружено, что значения твердости улучшаются при добавлении как упрочняющих компонентов, так и нагрузки на индентор. Результаты показывают, что значение твердости варьируется от 33,34 до 53,44 НВ, а влияние массового процента красного шлама было более значимым, чем нагрузки на индентор и массового процента золы из скорлупы кокосового ореха.

**Для цитирования:** Деванган Р., Шарма Б.П., Шарма Ш.С. Исследование характера изменения твердости композиционных материалов с алюминиевой матрицей, упрочненной золой кокосовой скорлупы и красным шламом, с использованием анализа Тагучи // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 3. – С. 179–191. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.3-179-191.

### Введение

В настоящее время широко используются алюмоматричные композиты (AL MMC) из-за хорошего отношения предела прочности к весу, а также благодаря высоким трибологическим свойствам. В обрабатывающей промышленности доступно большое количество материалов, поэтому нам нужны экономичные и высоко-

эффективные материалы, механические и химические свойства которых можно изменять в соответствии с требованиями потребителя. Благодаря упрочняющим наполнителям в алюмоматричных композитах можно адаптировать механические, химические и трибологические свойства последних к требованиям рынка и потребителя. В последнее десятилетие керамические наполнители на основе кремния, алюминия, титана и других элементов широко используются для упрочнения алюмоматричных композитов, но это повышает стоимость производства и обработки композиционных материалов [1].

#### \*Адрес для переписки

Шарма Шиам С., д.т.н., доцент

Манипалский университет, Джайпур,

303007, Джайпур, Индия

Тел.: +91-9887765320, e-mail: [shyamsunder.sharma@jaipur.manipal.edu](mailto:shyamsunder.sharma@jaipur.manipal.edu)

Промышленные и биологические отходы, такие как красный шлам, железная руда, зола рисовой шелухи, зола жома, зола скорлупы кокосового ореха и другие, обладают способностью заменять керамический наполнитель при разработке экономически эффективных композиционных материалов за счет снижения производственных затрат.

В данной исследовательской работе гибридный композиционный материал с металлической матрицей получен с использованием промышленных отходов красного шлама и биоотходов золы скорлупы кокосового ореха. Ранее многие исследователи применяли золу скорлупы кокосовых орехов в качестве адсорбента для удаления тяжелых металлов и красителей из водных растворов [2], при разработке строительных материалов, таких как кирпичная плитка [3], цементных и полимерных композитов [4, 5], а также для изготовления активированного угля [6]. В свою очередь, красный шлам используется в качестве материала покрытия [7], в качестве заполнителя строительного раствора [8], минерального вяжущего материала [9], керамического материала [10], для выщелачивания тяжелых металлов и в целом для очистки сточных вод [11]. Некоторые исследователи применяли комбинацию биологических отходов с керамическими материалами для создания и оценки гибридного алюмоматричного композита. В работе [12] использовали золу скорлупы кокосового ореха и графен для оценки свойств абразивного износа. В работах [13] и [14] использовали смесь отходов сельского хозяйства в виде золы скорлупы кокосового ореха и золы баггаза (отход сахарного тростника) с оксидом алюминия для оценки механических свойств разработанного гибридного алюмоматричного композита. В работах [15] и [16] использовали смесь золы рисовой шелухи с красным шламом и глиноземом соответственно для оценки трибомеханического поведения гибридных алюмоматричных материалов.

### *Твердость*

Твердость является важным параметром для проверки механической прочности композиционных материалов. Твердость композиционного материала зависит от различных факторов, таких как размер частиц наполнителя, термическая обработка, весовое соотношение упрочня-

ющего наполнителя и межзатомные связи между наполнителем и исходной матрицей. Ранее многие исследователи оптимизировали параметр твердости и пришли к выводу, что твердость композита повышается с увеличением размера частиц и термической обработки. Кроме того, твердость повышается до оптимального весового процента, который варьируется от упрочняющего наполнителя к композиту, поскольку обеспечивается хорошая межзатомная связь между упрочняющим наполнителем и матрицей, но при более высоком весовом проценте значение твердости снижается из-за агломерации упрочняющего наполнителя в слое матрицы, что вызывает образование ямок и полостей. Полости приводят к распространению трещин и снижению предела прочности и твердости [17].

Значения твердости зависят от множества параметров, таких как весовая доля упрочняющего наполнителя, инденторная нагрузка, поведение при обработке, межзатомные связи и др. По этой причине для экспериментов требуется большое количество образцов композита, и определять его характеристики становится дорого и трудоёмко. Таким образом, планирование эксперимента и анализ Тагучи являются подходящими подходами для оптимизации входных и выходных параметров. В настоящей работе алюминиевый композиционный материал, полученный методом литья с перемешиванием, и его значение твердости по Бринеллю оптимизируются с помощью ANOVA и регрессионного анализа. Выбранный ортогональный массив L27 плана эксперимента, влияние отношения сигнала к шуму, график нормальной вероятности остатка, характеристики отклика и контурные диаграммы сведены в таблицу для различных составных выборок.

### **Материалы и методы**

Алюминиевый сплав серии 5051 был выбран в качестве исходного материала благодаря высокой жесткости и отношению предела прочности к весу, высокой коррозионной стойкости, оптимальным тепловым свойствам и широкому использованию при разработке строительных материалов, в автомобильной и аэрокосмической промышленности. Красный шлам и зола скорлупы кокосовых орехов использовались в каче-

стве упрочняющего наполнителя для создания гибридного композитного материала. Красный шлам является твёрдыми отходами промышленного процесса обработки боксита и используется в качестве основного упрочняющего материала, содержание которого варьируется от 5 до 12,5 %, он закупался на алюминиевом заводе Valco. Около 100 кокосовых орехов были закуплены в различных храмах Джайпура для получения золы путем сжигания и просеивания. Доля золы скорлупы кокосовых орехов, используемой в качестве вспомогательного упрочняющего наполнителя, варьируется от 5 до 12,5 масс. %. Как красный шлам, так и зола скорлупы кокосовых орехов были должным образом просеяны, чтобы получить частицы размером около 50 мкм, поскольку твердость повышается с увеличением размера частиц.

### *Изготовление композиционного материала*

Девять алюминиевых образцов были изготовлены методом литья с перемешиванием. Для литья металлического алюминия использовали керамические тигли. Красный шлам и скорлупа кокосового ореха были предварительно нагреты до 200 °С с целью удаления влаги перед процессом литья. Параметры плавления и перемешивания оптимизировали с помощью панели управления. Были заданы следующие значения параметров: скорость перемешивания 50...100 об/мин, время перемешивания 20 минут, температура плавления 800 °С, температура предварительного нагрева 200 °С. Для разлива расплавленного металла была изготовлена цилиндрическая форма диаметром 20 мм и длиной 250 мм. С использованием ортогонального массива L9 были подготовлены девять образцов, при этом выбирался весовой процент отдельно крас-

ного шлама и золы скорлупы кокосового ореха в количестве 5, 7,5 и 12,5 вес. %. Твердость каждого композиционного образца рассчитывалась путем выбора трех параметров инденторной нагрузки – 10, 20 и 30 кН, контрольные переменные которых представлены в табл. 1.

### *План эксперимента*

Для определения характеристик материала требуется оптимальный выходной параметр с целью уменьшения количества переменных параметров, а также повышения эффективности и долговечности композитных образцов. Эта оптимизация достигается путем контроля входного параметра над выходным, а анализ Тагучи является оптимальной платформой для определения характеристик материалов [14]. Здесь три параметра – весовой процент красного шлама, весовой процент золы скорлупы кокоса и инденторная нагрузка – взяты для проверки реакции твердости по Бринеллю на гибридном алюминиевом композиционном материале. Для оценки реакции твердости были приняты три уровня входных параметров, поэтому для дисперсионного анализа и регрессионного анализа был выбран ортогональный массив L27, который является экспериментальным и прогнозируемым результатом регрессионного анализа, сведенным в табл. 1. В этой исследовательской работе с целью проверки значения твердости образцов гибридных алюминиевых композитов с помощью программного обеспечения Minitab 17 были проведены дисперсионный и регрессионный анализы. Весовой процент золы скорлупы кокосового ореха (CSA weight %), весовой процент красного шлама (RM weight %) и инденторная нагрузка приняты в качестве входных параметров. Уровень золы скорлупы кокосового ореха и красного шлама принят равным 5, 7,5 и 12,5 вес. % при

Таблица 1

Table 1

**Уровень управляющих переменных для твердости**  
**Level of Control variables for hardness**

Переменная	Ед. измерения	Уровень I	Уровень II	Уровень III
Красный шлам	вес. %	5	7,5	12,5
Зола скорлупы кокосового ореха	вес. %	5	7,5	12,5
Нагрузка на индентор	кН	10	20	30

нагрузке 10, 15 и 20 кН. Значения твердости образцов композитов с разными параметрами приведены в табл. 2.

На рис. 1 показано влияние твердости на отношение сигнал/шум (SN), здесь отклик оптимизирован для большего значения твердости, а среднее значение отношения SN варьируется от 31 до 32,6 значения твердости, что показывает оптимальную изменчивость выходного отклика твердости. Композиционный материал с наибольшим процентом упрочняющего напол-

нителя в виде красного шлама и золы скорлупы кокосового ореха с самой высокой инденторной нагрузкой имеет максимальную твердость 52,44 НВ, которая почти на 95 % больше, чем у композиционного материала с самым низким процентом упрочняющего наполнителя (5 вес. % золы скорлупы кокосового ореха и 5 вес. % красного шлама) и инденторной нагрузкой 10 кН. Таким образом, значение твердости улучшается с увеличением объемной доли упрочняющего наполнителя при нагрузке [18].

Таблица 2

Table 2

**Определение твердости по Бринеллю образцов алюминиевых композитов**  
**Brinell hardness characterization of aluminum composite specimens**

Красный шлам, %	Зола скорлупы кокосового ореха, %	Нагрузка на индентор, кН	Наблюдаемая твердость	Прогнозируемая твердость	Отношение сигнал/шум
5	5	10	33,52	32,78	30,50696
5	5	15	34,75	35,02	30,82105
5	5	20	36,61	37,30	31,27347
5	7,5	10	35,12	35,94	30,91267
5	7,5	15	36,11	38,22	31,15281
5	7,5	20	38,22	40,50	31,64756
5	12,5	10	35,47	35,71	30,99823
5	12,5	15	37,60	37,95	31,50574
5	12,5	20	38,38	40,27	31,68409
7,5	5	10	36,27	34,95	31,1922
7,5	5	15	38,60	37,22	31,73368
7,5	5	20	39,21	39,50	31,8698
7,5	7,5	10	37,64	35,94	31,51387
7,5	7,5	15	38,99	38,22	31,82011
7,5	7,5	20	39,93	40,50	32,02644
7,5	12,5	10	38,09	37,92	31,61843
7,5	12,5	15	39,85	40,20	32,00981
7,5	12,5	20	40,32	42,48	32,11192
12,5	5	10	38,49	39,36	31,70709
12,5	5	15	39,33	41,64	31,89633
12,5	5	20	42,39	43,94	32,54664
12,5	7,5	10	39,04	40,35	31,83158
12,5	7,5	15	40,60	42,63	32,17236
12,5	7,5	20	48,72	44,91	33,75489
12,5	12,5	10	41,53	42,34	32,3691
12,5	12,5	15	43,51	44,62	32,77234
12,5	12,5	20	52,44	46,9	34,39448

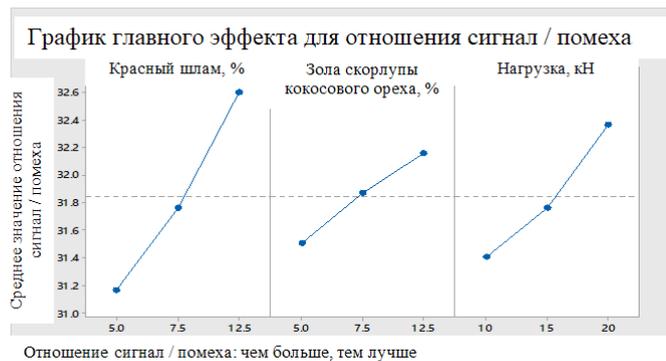


Рис. 1. Среднее влияние отношения сигнал/шум на твердость по Бринеллю

Fig. 1. Mean effect of signal-to-noise ratio on Brinell hardness

### Изменение твердости

Изменение твердости гибридного алюминиевого композиционного материала, упрочненного красным шламом (RM) и золой скорлупы кокосового ореха (CSA), представлено в табл. 2. Твердость повышается с увеличением процентного содержания упрочняющего наполнителя, поскольку твердая и хрупкая фаза наполнителя создает смазывающую плотность дислокаций, в то время как применение нагрузки плотности дислокаций приводит к образованию новых полей деформации, которые противостоят движению дислокаций [19]. Разница температур плавления между упрочняющим наполнителем и алюминиевой матрицей также активирует механизм деформационного упрочнения за счет переноса поля деформации вдоль границы зерна, что создает барьерное поле вдоль матрицы и препятствует вдавливанию индентора, а следовательно, повышает твердость композитов [20].

Из рис. 2 видно, что значение твердости увеличивается с ростом нагрузки, поскольку в условиях высокой нагрузки смазочный слой (образованный за счет термического несоответствия между упрочняющим наполнителем и алюминиевой матрицей) создает сильное силовое поле дислокации вдоль области границ зерен алюминия, которое сопротивляется вдавливанию индентора, что поддерживает тенденцию увеличения твердости. Из рис. 2 также видно, что твердость растет по мере увеличения процентного содержания упрочняющего наполнителя, поскольку сочетание обоих упрочняющих компонентов может измельчить зернистую струк-

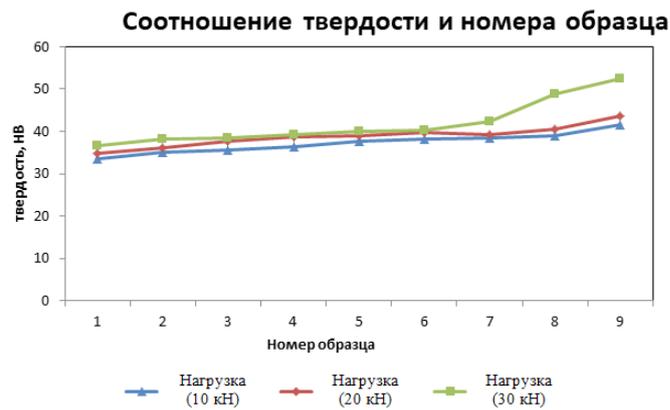


Рис. 2. Изменение твердости в зависимости от нагрузки

Fig. 2. Hardness variation with respected to load

туру композита, а присутствие твердой и хрупкой фазы оксида кремния, оксида алюминия и оксида железа приводит к образованию прочной межзатомной связи между алюминиевой матрицей и упрочняющим наполнителем. При этом требуется большая инденторная нагрузка для облегчения царапания, что повышает твердость [21]. Согласно табл. 2 было использовано девять образцов, при этом выбирался весовой процент отдельно красного шлама и золы скорлупы кокосового ореха в количестве 5, 7,5 и 12,5 вес. %. Кроме того, для оценки изменения твердости выбраны три значения инденторной нагрузки: 10, 20 и 30 кН. Результаты оценки приведены на рис. 2.

### Результаты и их обсуждения

#### Дисперсионный анализ (ANOVA)

В табл. 3 представлены данные откликов на выходную твердость и показано, что весовой процент красного шлама имеет более высокий ранг, чем инденторная нагрузка и доля золы скорлупы кокосового ореха. Это очень полезный инструмент для проверки влияния входного параметра на выходной отклик. В табл. 4 приведены результаты дисперсионного анализа, который является ценным инструментом для проверки соответствия различных входных переменных выходным результатам. Вклад весового процента красного шлама достигает 48,80 %, весового процента золы скорлупы кокосового ореха – 10,41 % и инденторной нагрузки – 23,01 %. Результаты того же типа представлены в таблице

Таблица 3

Table 3

**Таблица значений твердости**  
**Response table for hardness**

Уровень	Красный шлам, %	Зола скорлупы кокосового ореха, %	Нагрузка на индентор, кН
1	36,20	37,69	37,25
2	38,77	39,38	38,82
3	42,90	40,81	41,56
Дельта	6,70	3,11	4,56
Место (ранг)	1	3	2

Таблица 4

Table 4

**Результаты дисперсионного (ANOVA) анализа для твердости**  
**ANOVA for Brinell hardness**

Источник	Степень свободы <i>DF</i>	Скорректированное значение внутри- групповой измен- чивости (дисперсия ошибки) <i>Adj SS</i>	Скорректированное значение дисперсии <i>Adj MS</i>	<i>F</i> -зна- чение	<i>P</i> -зна- чение	Вклад, %
Красный шлам, %	2	205,446	102,723	65,54	0,000	48,80
Зола скорлупы кокосового ореха, %	2	43,744	21,872	13,96	0,002	10,41
Нагрузка на индентор, кН	2	96,652	48,326	30,83	0,000	23,01
Красный шлам, %.* Зола скорлупы кокосового ореха, %	4	16,548	4,137	2,64	0,113	3,94
Красный шлам, %.* Нагрузка на индентор, кН	4	40,826	10,206	6,51	0,012	9,73
Зола скорлупы кокосового ореха, %.* Нагрузка на индентор, кН	4	4,641	1,160	0,74	0,590	1,15
Погрешность	8	12,539	1,567	–	–	2,29
ИТОГО	26	420,396	–	–	–	–

\* Среднеквадратическое отклонение  $S = 1,2519$ ;  $R^2 = 97,02$  %; скорректированное  $R^2 = 90,31$  %

откликов. Влияние весового процента красного шлама на твердость превосходит влияние весового процента золы скорлупы кокосового ореха и инденторной нагрузки, поскольку красный шлам содержит промышленные соединения, такие как  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $TiO_2$  и другие, которые поддерживают механизм упрочнения алюминиевых композиционных материалов [14].

Значение коэффициента детерминации  $R^2$  и скорректированное значение  $R^2$  падают на 97,02 и 90,31 %, что показывает изменчивость выходного ответа в зависимости от различных входных параметров. Оба значения  $R$  находятся в хорошем диапазоне изменчивости, и этот анализ также используется для дальнейшей проверки механической твердости гибридного алюминиевого композиционного материала.

### Регрессионный анализ

Для значения твердости было составлено уравнение линейной регрессии с использованием параметров для красного шлама, золы скорлупы кокосового ореха и инденторной нагрузки, принятых в качестве входных параметров:

$$HB = 21,78 + 0,883 \text{ красного шлама} + \\ + 0,397 \text{ золы скорлупы кокосового ореха} + \\ + 0,4562 \text{ инденторной нагрузки},$$

а отклик твердости по Бринеллю был проанализирован с уровнем вероятности 95 %.

Приведенное уравнение показывает регрессию твердости, а в табл. 1 показано прогнозируемое значение, основанное на этом уравнении. Обнаружено, что ошибка прогнозируемого значения по сравнению с экспериментальным значением составляет всего 4 %, поэтому данное уравнение регрессии можно использовать для дальнейшего анализа [22, 23].

График нормальной вероятности, построенный для уровня достоверности 95 %, и прямая линия показывают линию уравнения регрессии (рис. 3). С помощью этого остаточного значения показано, что все отклонения твердости очень близки к линии регрессии; из 27 данных около четырех выходят за пределы оптимального остаточного значения. Поэтому эту гибридную композиционную комбинацию можно считать подходящей для дальнейшего анализа расчета твердости.

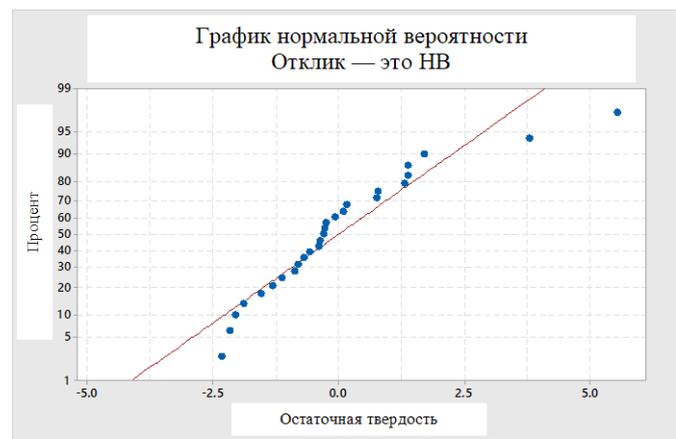
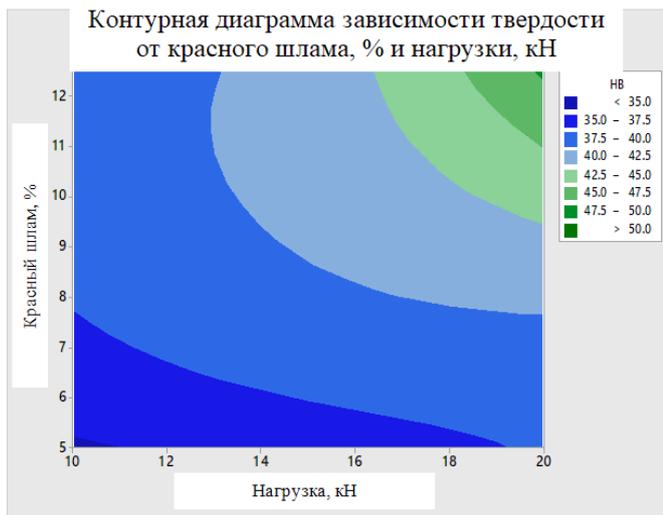


Рис. 3. График нормальной вероятности остаточной твердости гибридных алюминиевых композитов

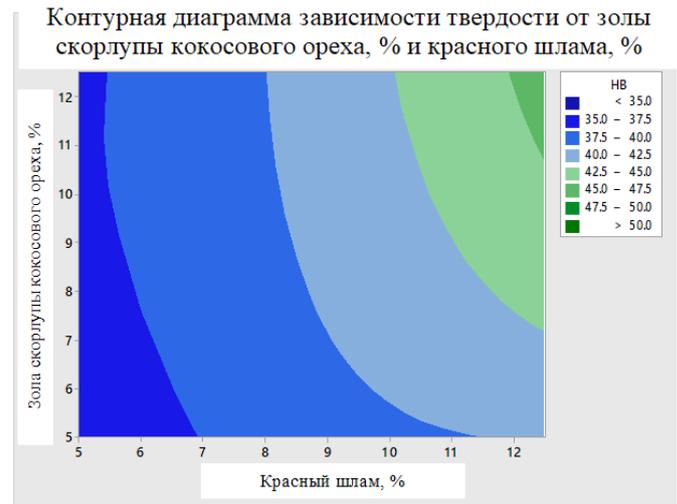
Fig. 3. Normal probability plot for residual on hardness of Hybrid Al composites

### Влияние контурной диаграммы на твердость

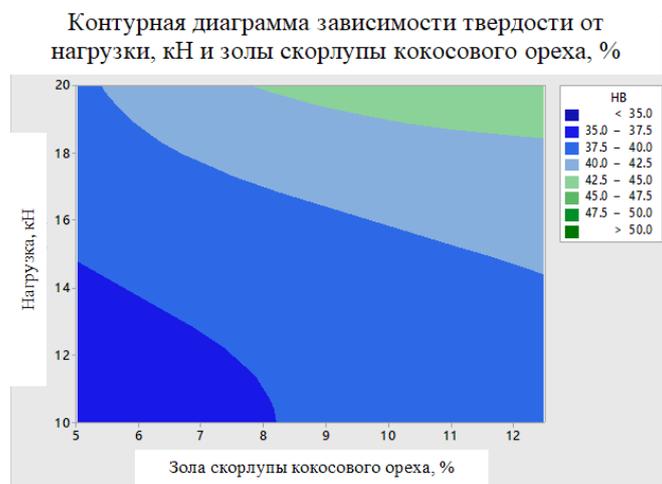
На рис. 4 показано изменение контурной диаграммы различных входных параметров в зависимости от выходных значений твердости. По осям абсцисс и ординат отображается комбинация весовых процентов красного шлама, золы скорлупы кокосового ореха и инденторной нагрузки. Результаты показывают, что все комбинированные максимальные вариации твердости приходятся на диапазон значений 37,5...40 HB, а диапазон значений 47,5...50 HB имеет очень малый диапазон площади. Весовой процент красного шлама оказывает более сильное влияние, чем весовой процент золы скорлупы кокосового ореха и изменение инденторной нагрузки. Значение твердости повышается с увеличением массовой доли красного шлама и изменением инденторной нагрузки; незначительный рост твердости происходит с повышением весового процента золы скорлупы кокосового ореха, поскольку летучий характер красного шлама в алюминиевой матрице и низкий удельный вес золы скорлупы кокосового ореха улучшают область контакта с поверхностью вдоль матрицы. Таким образом, больше промежуточной области контакта доступно для включения упрочняющего наполнителя, и благодаря эффекту спекания красный шлам и зола скорлупы кокосового ореха размещаются в промежуточной области, которая действует как барьер для деформационного движения под действием инденторной нагрузки, что повышает твердость [24].



а



б



в

Рис. 4. Контурная диаграмма изменения значения твердости в осях: красный шлам – нагрузка (а); нагрузка – зола из скорлупы кокосового ореха (б); зола из скорлупы кокосового ореха – красный шлам (в)  
 Fig 4. Variation of contour plot of Hardness value on (a) red mud vs load; (б) load vs coconut shell ash (в) coconut shell ash vs red mud

### Закключение

Гибридный алюмоматричный композит успешно разработан путем армирования красным шламом и золой скорлупы кокосового ореха в процессе литья с перемешиванием при поддержании температуры в печи на уровне 800 °С. Было приготовлено девять образцов композита, твердость по Бринеллю оптимизированных образцов измерена с помощью твердомера. Для дисперсионного и регрессионного анализа использовался ортогональный массив L27 по методу Тагучи. В качестве входных данных были взяты три параметра: весовой процент красного шлама, весовой процент золы скорлупы кокоса и

инденторная нагрузка, а твердость – в качестве выходных данных. В результате оптимизационного анализа сделан вывод о том, что твердость композита растет за счет увеличения весового процента упрочняющего наполнителя и инденторной нагрузки. Согласно анализу откликов, весовой процент красного шлама вносит максимальный вклад в диапазоне 48,80 %, что превосходит вклад весового процента золы кокосового ореха и вклад инденторной нагрузки. Значение твердости показывает погрешность всего в 4 % по сравнению с прогнозируемым значением регрессии, и все значения твердости, попадающие в диапазон уравнения регрессии, показывают меньшую изменчивость остаточного значения.

### Список литературы

1. *Verma N., Vettivel S.C.* Characterization and experimental analysis of boron carbide and rice husk ash reinforced AA7075 aluminium alloy hybrid composite // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2018. – Vol. 741. – P. 981–998. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.01.185.
2. *Bharathi P., Kumar T.S.* Mechanical characteristics and wear behaviour of Al/SiC and Al/SiC/B<sub>4</sub>C hybrid metal matrix composites fabricated through powder metallurgy route // *Silicon*. – 2023. – Vol. 15 (10). – P. 4259–4275. – DOI: 10.1007/s12633-023-02347-0.
3. *Sundarababu J., Anandan S.S., Griskevicius P.* Evaluation of mechanical properties of biodegradable coconut shell/rice husk powder polymer composites for light weight applications // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – Vol. 39. – P. 1241–1247.
4. A new treatment for coconut fibers to improve the properties of cement-based composites – Combined effect of natural latex/pozzolanic materials / E.J. Da Silva, M.L. Marques, F.G. Velasco, C.F. Junior, F.M. Luzardo, M.M. Tashima // *Sustainable Materials and Technologies*. – 2017. – Vol. 12. – P. 44–51. – DOI: 10.1016/j.susmat.2017.04.003.
5. Fabrication and characterization of adding coconut shell activated nanocarbon to lightweight concrete / H. Lubis, E. Sharman, E. Chairina, I. Siregar, M. Rizky, D. Maiya, T. Machdhalie // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – Vol. 1428 (1). – P. 012039. – DOI: 10.1088/1742-6596/1428/1/012039.
6. The feasibility of using red mud in coatings based on glyptal resins / L. Melnyk, O. Myronyuk, V. Ratushnyi, D. Baklan // *French-Ukrainian Journal of Chemistry*. – 2020. – Vol. 8 (1). – P. 88–94. – DOI: 10.17721/fujcV8I1P88-94.
7. Feasibility of preparing red mud-based cementitious materials: Synergistic utilization of industrial solid waste, waste heat, and tail gas / Z. Li, J. Zhang, S. Li, C. Lin, Y. Gao, C. Liu // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – Vol. 285. – P. 124896. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124896.
8. *Kang S.P., Kwon S.J.* Effects of red mud and alkali-activated slag cement on efflorescence in cement mortar // *Construction and Building Materials*. – 2017. – Vol. 133. – P. 459–467. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.123.
9. A laboratory-scale experimental investigation on the reuse of a modified red mud in ceramic materials production / C. Scribot, W. Maherzi, M. Benzerzour, Y. Mamindy-Pajany, N.E. Abriak // *Construction and Building Materials*. – 2018. – Vol. 163. – P. 21–31. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.092.
10. Efficient removal of antimony (III) in aqueous phase by nano-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> modified high-iron red mud: study on its performance and mechanism / Y. Peng, L. Luo, S. Luo, K. Peng, Y. Zhou, Q. Mao, Y. Yang // *Water*. – 2021. – Vol. 13 (6). – P. 809. – DOI: 10.3390/w13060809.
11. *Sharma R., Pradhan M.K., Jain P.* Fabrication, characterization and optimal selection of aluminium alloy 8011 composites reinforced with B<sub>4</sub>C-aloe vera ash // *Materials Research Express*. – 2023. – Vol. 10 (11). – P. 116513. – DOI: 10.1088/2053-1591/acc32.
12. Optimizing wear performance: comprehensive analysis of aluminium 6061 metal matrix composites reinforced with coconut shell ash and graphene / L.J. Kumar, J.P. Ganjigatti, G. Irfan, R. Thara // *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*. – 2024. – P. 1–17. – DOI: 10.1007/s40033-023-00630-3.
13. *Kumar A., Singh R.C., Chaudhary R.* Investigation of nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and micro-coconut shell ash (CSA) reinforced AA7075 hybrid metal–matrix composite using two-stage stir casting // *Arabian Journal for Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 47 (12). – P. 15559–15573. – DOI: 10.1007/s13369-022-06728-2.
14. Experimental analysis and mechanical characterization of Al 6061/alumina/bagasse ash hybrid reinforced metal matrix composite using vacuum-assisted stir casting method / N.K. Chandla, Yashpal, S. Kant, M.M. Goud, C.S. Jawalkar // *Journal of Composite Materials*. – 2020. – Vol. 54 (27). – P. 4283–4297. – DOI: 10.1177/0021998320929417.
15. *Dewangan R., Pandey P.K., Dohare R.* Analysis on mechanical behaviour of hybrid aluminium metal matrix composite material using rice husk ash and iron ore tailing // *Turkish Online Journal of Qualitative Inquiry*. – 2021. – Vol. 12 (3).
16. *Gupta V., Kumar R.* Investigating the mechanical and tribological properties of aluminium metal matrix composite reinforced with rice husk ash and aluminium oxide // *International Journal of Precision Technology*. – 2020. – Vol. 9 (4). – P. 324–334. – DOI: 10.1504/IJPTech.2020.112697.
17. *Singh J., Chauhan A.* Investigations on dry sliding frictional and wear characteristics of SiC and red mud reinforced Al2024 matrix hybrid composites using Taguchi's approach // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. – 2019. – Vol. 233 (9). – P. 1923–1938. – DOI: 10.1177/1464420718803126.
18. Development of novel stir cast aluminium composite with modified coconut shell ash filler / B. Panda, C.A. Niranjana, A.D. Vishwanatha, P. Harisha, K.R. Chandan, R. Kumar // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – Vol. 22. – P. 2715–2724. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.03.402.
19. *Kar C., Surekha B.* Characterisation of aluminium metal matrix composites reinforced with titanium carbide and red mud // *Materials Research Innovations*. – 2021. – Vol. 25 (2). – P. 67–75. – DOI: 10.1080/14328917.2020.1735683.

20. Development of aluminium 5056/SiC/bagasse ash hybrid composites using stir casting method / T.M. Harish, S. Mathai, J. Cherian, K.M. Mathew, T. Thomas, K.V. Prasad, V.C. Ravi // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – Vol. 27. – P. 2635–2639. – DOI: 10.1016/j.matpr.2019.11.081.
21. Effect of red mud on mechanical and microstructural characteristics of aluminum matrix composites / P. Samal, R. Raj, R.K. Mandava, P.R. Vundavilli // *Advances in Materials and Manufacturing Engineering: Proceedings of ICAMME 2019*. – Singapore: Springer, 2020. – P. 75–82. – DOI: 10.1007/978-981-15-1307-7\_8.
22. *Biswas R., Sarkar A.* A two-step approach for arsenic removal by exploiting an autochthonous Delftia sp. BAs29 and neutralized red mud // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2021. – Vol. 28. – P. 40665–40677. – DOI: 10.1007/s11356-020-10665-8.
23. *Kumar P.V., Paranthaman P.* Friction stir welding process parametric optimization of hybrid aluminium-bagasse ash-graphite composite by Taguchi approach // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – Vol. 37. – P. 764–768. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.05.789.
24. *Khalid M.Y., Umer R., Khan K.A.* Review of recent trends and developments in aluminium 7075 alloys and metal matrix composites (MMCs) for aircraft applications // *Results in Engineering*. – 2023. – Vol. 20. – P. 101372. – DOI: 10.1016/j.rineng.2023.101372.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



# Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Investigation of hardness behavior in aluminum matrix composites reinforced with coconut shell ash and red mud using Taguchi analysis

Rishi Dewangan<sup>1, a</sup>, Bhupendra Sharma<sup>2, b</sup>, Shyam Sharma<sup>3, c, \*</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Amity University Rajasthan, Jaipur, 303002, India

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Amity University Uttar Pradesh, Noida, 201313, India

<sup>3</sup> Department of Mechanical Engineering, Manipal University Jaipur, Jaipur, 303007, India

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1973-6726>, [rdewangan@jpr.amity.edu](mailto:rdewangan@jpr.amity.edu); <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3207-7286>, [bpsharma@amity.edu](mailto:bpsharma@amity.edu);

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1510-5871>, [shyamsunder.sharma@jaipur.manipal.edu](mailto:shyamsunder.sharma@jaipur.manipal.edu)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 14 April 2024

Revised: 17 May 2024

Accepted: 22 June 2024

Available online: 15 September 2024

#### Keywords:

Anova analysis

Coconut Shell Ash

Hardness

Red Mud

### ABSTRACT

**Introduction:** in present scenario, light and high strength aluminium metal matrix composite are extensively used due to its high mechanical and tribological properties. Aluminium metal matrix composite reinforced with ceramic and industrial waste can customize its mechanical-chemical behavior. **The purpose of the work:** to create an aluminum matrix composite material using ceramic (primary) and industrial (secondary) waste represented by red mud and coconut shell ash, respectively. The mass fraction of the strengthening phase varied from 5 to 12.5 wt. % respectively with the residual mass percentage of the aluminum alloy. **Method of investigation:** nine specimens of composite materials were prepared by stir casting. Stirring was carried out at a speed of 50 to 100 rpm for 20 minutes at a temperature of 800 °C. **Result and Discussion:** the hardness behavior of the aluminum metal matrix composite was studied at an indentation load of 10, 15 and 20 kN. Taguchi method with L27 orthogonal array was selected to conduct analysis of variance (ANOVA) and regression analysis by selecting the mass percentage of red mud and mass percentage of coconut shell ash. The indentation load was used as an input parameter, and the hardness behavior was taken as an output parameter. The signal-to-noise ratio, response rank table, contour plot, and normal probability plot are investigated and it is found that hardness values improve with the addition of both reinforcing components and indenter load. The results show that the hardness value varies from 33.34 HB to 53.44 HB, and the effect of red mud mass percentage is more significant than the indenter load and coconut shell ash mass percentage.

**For citation:** Dewangan R., Sharma B.P., Sharma S.S. Investigation of hardness behavior in aluminum matrix composites reinforced with coconut shell ash and red mud using Taguchi analysis. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 3, pp. 179–191. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.3-179-191. (In Russian).

### References

1. Verma N., Vettivel S.C. Characterization and experimental analysis of boron carbide and rice husk ash reinforced AA7075 aluminium alloy hybrid composite. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, vol. 741, PP. 981–998. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.01.185.
2. Bharathi P., Kumar T.S. Mechanical characteristics and wear behaviour of Al/SiC and Al/SiC/B4C hybrid metal matrix composites fabricated through powder metallurgy route. *Silicon*, 2023, vol. 15 (10), pp. 4259–4275. DOI: 10.1007/s12633-023-02347-0.
3. Sundarababu J., Anandan S.S., Griskevicius P. Evaluation of mechanical properties of biodegradable coconut shell/rice husk powder polymer composites for light weight applications. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 39, pp. 1241–1247.
4. Da Silva E.J., Marques M.L., Velasco F.G., Junior C.F., Luzardo F.M., Tashima M.M. A new treatment for coconut fibers to improve the properties of cement-based composites – Combined effect of natural latex/pozzolanic materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 2017, vol. 12, PP. 44–51. DOI: 10.1016/j.susmat.2017.04.003.

#### \* Corresponding author

Sharma Shyam S., D.Sc. (Engineering), Assistant Professor  
 Manipal University Jaipur,  
 303007, Jaipur, India

Tel.: +91-9887765320, e-mail: shyamsunder.sharma@jaipur.manipal.edu

5. Lubis H., Sharman E., Chairina E., Siregar I., Rizky M., Maiya D., Machdhalie T. Fabrication and characterization of adding coconut shell activated nanocarbon to lightweight concrete. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1428 (1), p. 012039. DOI: 10.1088/1742-6596/1428/1/012039.
6. Melnyk L., Myronyuk O., Ratushniy V., Baklan D. The feasibility of using red mud in coatings based on glyptal resins. *French-Ukrainian Journal of Chemistry*, 2020, vol. 8 (1), pp. 88–94. DOI: 10.17721/fujcV8I1P88-94.
7. Li Z., Zhang J., Li S., Lin C., Gao Y., Liu C. Feasibility of preparing red mud-based cementitious materials: Synergistic utilization of industrial solid waste, waste heat, and tail gas. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 285, p. 124896. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124896.
8. Kang S.P., Kwon S.J. Effects of red mud and alkali-activated slag cement on efflorescence in cement mortar. *Construction and Building Materials*, 2017, vol. 133, pp. 459–467. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.123.
9. Scribot C., Maherzi W., Benzerzour M., Mamindy-Pajany Y., Abriak N.E. A laboratory-scale experimental investigation on the reuse of a modified red mud in ceramic materials production. *Construction and Building Materials*, 2018, vol. 163, pp. 21–31. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.092.
10. Peng Y., Luo L., Luo S., Peng K., Zhou Y., Mao Q., Yang Y. Efficient removal of antimony (III) in aqueous phase by nano-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> modified high-iron red mud: study on its performance and mechanism. *Water*, 2021, vol. 13 (6), p. 809. DOI: 10.3390/w13060809.
11. Sharma R., Pradhan M.K., Jain P. Fabrication, characterization and optimal selection of aluminium alloy 8011 composites reinforced with B<sub>4</sub>C-aloe vera ash. *Materials Research Express*, 2023, vol. 10 (11), p. 116513. DOI: 10.1088/2053-1591/acec32.
12. Kumar L.J., Ganjigatti J.P., Irfan G., Thara R. Optimizing wear performance: comprehensive analysis of aluminium 6061 metal matrix composites reinforced with coconut shell ash and graphene. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 2024, pp. 1–17. DOI: 10.1007/s40033-023-00630-3.
13. Kumar A., Singh R.C., Chaudhary R. Investigation of nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and micro-coconut shell ash (CSA) reinforced AA7075 hybrid metal–matrix composite using two-stage stir casting. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2022, vol. 47 (12), pp. 15559–15573. DOI: 10.1007/s13369-022-06728-2.
14. Chandla N.K., Yashpal, Kant S., Goud M.M., Jawalkar C.S. Experimental analysis and mechanical characterization of Al 6061/alumina/bagasse ash hybrid reinforced metal matrix composite using vacuum-assisted stir casting method. *Journal of Composite Materials*, 2020, vol. 54 (27), pp. 4283–4297. DOI: 10.1177/0021998320929417.
15. Dewangan R., Pandey P.K., Dohare R. Analysis on mechanical behaviour of hybrid aluminium metal matrix composite material using rice husk ash and iron ore tailing. *Turkish Online Journal of Qualitative Inquiry*, 2021, vol. 12 (3).
16. Gupta V., Kumar R. Investigating the mechanical and tribological properties of aluminium metal matrix composite reinforced with rice husk ash and aluminium oxide. *International Journal of Precision Technology*, 2020, vol. 9 (4), pp. 324–334. DOI: 10.1504/IJPTECH.2020.112697.
17. Singh J., Chauhan A. Investigations on dry sliding frictional and wear characteristics of SiC and red mud reinforced Al2024 matrix hybrid composites using Taguchi's approach. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 2019, vol. 233 (9), pp. 1923–1938. DOI: 10.1177/1464420718803126.
18. Panda B., Niranjana C.A., Vishwanatha A.D., Harisha P., Chandan K.R., Kumar R. Development of novel stir cast aluminium composite with modified coconut shell ash filler. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 22, pp. 2715–2724. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.03.402.
19. Kar C., Surekha B. Characterisation of aluminium metal matrix composites reinforced with titanium carbide and red mud. *Materials Research Innovations*, 2021, vol. 25 (2), pp. 67–75. DOI: 10.1080/14328917.2020.1735683.
20. Harish T.M., Mathai S., Cherian J., Mathew K.M., Thomas T., Prasad K.V., Ravi V.C. Development of aluminium 5056/SiC/bagasse ash hybrid composites using stir casting method. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 27, pp. 2635–2639. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.11.081.
21. Samal P., Raj R., Mandava R.K., Vundavilli P.R. Effect of red mud on mechanical and microstructural characteristics of aluminum matrix composites. *Advances in Materials and Manufacturing Engineering: Proceedings of ICAMME 2019*. Singapore, Springer, 2020, pp. 75–82. DOI: 10.1007/978-981-15-1307-7\_8.



22. Biswas R., Sarkar A. A two-step approach for arsenic removal by exploiting an autochthonous *Delftia* sp. BAs29 and neutralized red mud. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, vol. 28, pp. 40665–40677. DOI: 10.1007/s11356-020-10665-8.

23. Kumar P.V., Paranthaman P. Friction stir welding process parametric optimization of hybrid aluminium-bagasse ash-graphite composite by Taguchi approach. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 37, pp. 764–768. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.05.789.

24. Khalid M.Y., Umer R., Khan K.A. Review of recent trends and developments in aluminium 7075 alloys and metal matrix composites (MMCs) for aircraft applications. *Results in Engineering*, 2023, vol. 20, p. 101372. DOI: 10.1016/j.rineng.2023.101372.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2024 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).