

ИЗМЕРЕНИЕ ТВЕРДОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ГИБРИДНОМ МЕТАЛЛИЧЕСКОМ МАТРИЧНОМ КОМПОЗИТЕ, СОЗДАВАЕМОЙ ПОВОРОТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АБРАЗИВНОЙ СТРУИ ВОДЫ И WED

Автор: Ashish Kumar Srivastava, Akash Nag, Amit Rai Dixit, Jiri Scucka, Sergej Hloch, Dagmar Klichova, Petr Hlavacek, Sandeep Tiwari

Перевод автора: Пащук Оксана

Источник : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224118308558>

Аннотация

В работе рассматривается измерение микротвердости до глубины 3 мкм на гибридном композите металлической матрицы A359 / Al₂O₃ / В₄С с поверхности, созданной поворотом электрического разворота проволоки и абразивной гидроабразивной резкой с одинаковым диапазоном скорости вращения. Исследование также включает топографические и морфологические аспекты измерений для сравнения качества поверхности. Микротвердость измеряли с помощью теста вдавливания Виккерса при нагрузке 100 г в течение 10 с. Параметры профиля шероховатости поверхности (Ra, Rq и Rz) и визуализация 3D-поверхности измерялись оптической профилометрией. Лазерный конфокальный микроскоп был использован для характеристики топографических деталей. FE-SEM-анализ был использован для обсуждения морфологических наблюдений и изучения качества и дефектов обрабатываемых поверхностей. Элемент подповерхности, такой как остаточные напряжения, также исследуется через профиль глубины для обоих типов процесса поворота с помощью машины XRD. Результаты показали, что более низкое значение микротвердости (165 HV) по сравнению с литым образцом (200 HV) наблюдалось в переработанном слое проводки электрического разряда, а также индукции остаточного напряжения растяжения (340 МПа). Во время абразивной струи воды наблюдалось номинальное изменение микротвердости (204 HV) наряду с остаточным напряжением сжатия (-285 МПа).

1 . Вступление

Постоянный спрос на материалы нового класса для удовлетворения конкретных функций привел к разработке металлических матричных композитов (ММС). Он состоит в основном из двух составляющих: один - металлическая фаза (основной металл), а другая - неметаллическая фаза (армирование), которая распределяется по всей фазе матрицы [1]. Добавление более одного типа арматуры с различными свойствами делает гибридные ММС, которые обладают улучшенным качеством и преодолевают недостатки ММС [2]. ГМК на основе алюминия являются наиболее подходящими материалами для автомобильной промышленности из-за его небольшого веса и отличных механических и термофизических свойств [3]. Из-за широкого применения ММС требуется точная обработка с удовлетворительными результатами обработки. Тем не менее, он все еще ищет подходящие методы обработки, которые обеспечивают благоприятные результаты с этими ММС [4]. Наличие твердых упрочняющих частиц приводит к высокому износу инструмента и снижению качества поверхности при обычной механической обработке [4]. Из прошлых исследований можно отметить, что обычная обработка предпочтительнее обычной обработки. Ключевыми преимуществами этих методов при традиционной механической обработке являются то, что они менее подвержены влиянию типа материала, а также его твердости и прочности [5]. В настоящем исследовании для проведения экспериментов выбраны поворот электроразрядной проводки (WED) и абразивный гидроагрегат (AWJ), оба из которых они выбраны. WED-поворот - это процесс термической эрозии посредством искрообразования, в котором операция поворота выполняется путем перемещения электродвигателя проволоки против электропроводящей цилиндрической вращающейся заготовки. В процессе термической эрозии поворота WED обрабатываемые поверхности расплавляются, испаряются и

повторно затвердевают в виде слоя перестройки на обрабатываемой поверхности. Слой Recast состоит из нескольких микротрещин и мелкомасштабной пористости. С другой стороны, AWJ-поворот является одной из новейших технологий нетрадиционной обработки, при которой поворот может быть осуществлен путем удара высокоскоростной абразивной струи воды на поверхность мишени, из-за которой поверхность может волноваться и приводит к пластической деформации. Поэтому улучшенное качество поверхности по-прежнему является важной областью исследований из-за отсутствия какого-либо точного решения. В контексте приемлемости процесса обработки учитываются различные факторы, которые зависят от параметров установки и физических свойств выбранного материала [6]. Изотропная характеристика обрабатываемой поверхности также является важным фактором при определении функциональности, долговечности и срока службы обрабатываемых деталей [7].

Обработанная поверхность характеризуется микротвердостью поверхности, текстурой поверхности, металлургическим и топографическим анализом. Из-за процесса механической обработки также влияют тепловые и физические свойства обрабатываемых поверхностей и его подповерхностей. Следовательно, основные параметры исследования поверхности включают измерение в зависимости от микротвердости поверхности и остаточного напряжения на обрабатываемой поверхности, а также на глубине под обработанной поверхностью. Другие параметры, такие как измерение параметров шероховатости поверхности (R_a , R_q и R_z), визуализация поверхности с 3D-обработкой, двумерные и трехмерные поверхностные топографические описания и изучение морфологических аспектов с точки зрения поверхностных дефектов, могут также использоваться для описания качества обработки [8].

Многие авторы сообщили о своей работе, связанной с изучением поверхностной твердости, топографии и морфологических деталей [9]. Оборот WED был впервые сообщен Masuzawa et al. [10]. Они изготовили штыри небольшого диаметра для микро-EDM-приложений. Влияние процесса простой струйной и абразивной гидроабразивной обработки на титановый сплав Ti6Al4V для изучения остаточного напряжения и анализа текстуры поверхности было сообщено Arola et al. [11]. Они исследовали остаточное напряжение сжатия в обоих процессах и плохую поверхностную поверхность через AWJ по сравнению с простой гидроабразивной установкой. Hloch et al. [12] исследовал шероховатость поверхности алюминиевой детали во время обработки AWJ. Независимые параметры процесса, такие как абразивный массовый расход, давление, направление подачи и скорость перемещения, были выбраны с использованием полной факториальной конструкции на двух уровнях. Хаддад и др. [13] повернула инструментальную сталь AISI D3 через процесс поворота WED и изучила шероховатость (R_a), MRR и округлость. Mohammadi et al. [14] оптимизировал MRR, контролируя параметры процесса, такие как мощность, напряжение, скорость проводов, напряжение в проводах, время выключения импульсов и скорость вращения во время процесса поворота WED. Поверхностное топографическое сравнение различных стальных поверхностей было сделано Valicek et al. [15] при обработке AWJ. Скорость перемещения в качестве переменной была выбрана для изучения влияния скорости на топографию поверхности, а геометрия поверхности была объяснена теневым методом. Джанардхан и Сэмюэль [16] работали над данными о импульсных поездках, чтобы объяснить причину низкого MRR во время процесса поворота WED по сравнению с механической обработкой WED. Они отметили, что во время вращательного движения число областей дуги и ее продолжительность, создаваемые процессом поворота WED, больше, чем при обработке WED. Хаддад и др. [17] далее сообщалось о влиянии параметров процесса поворота WED на MRR с использованием методологии поверхности ответа (RSM) и методики оптимизации. Их результат показывает, что для максимального MRR напряжение и мощность должны быть как можно выше. Поверхностная топография титана второго класса методом AWJ была исследована Брилловой и Олидалем [18]. Для оценки

спектральной плотности и ее структуры, связанной с тонкой текстурой поверхности, они использовали комбинированную периодическую теорию и метод Welch. Zelenak et al. [19] сравнивали резку AWJ и CO₂-лазерного процесса на титане сорта ASTM B265-99, чтобы объяснить поверхностную топографическую разницу. Процесс превращения WED был впервые применен на Al / SiC-MMC Rajkumar et al. [20] В его исследовании было исследовано влияние параметров процесса WEDT, таких как импульс во времени, напряжение разрыва и скорость шпинделя для измерения MRR. Их результаты показали, что при более низкой скорости шпинделя и напряжении зазора MRR будет максимальным. Однако информации о качестве обрабатываемых поверхностей не сообщалось. Сверление гибридной MMC A356 / SiC / Mica было сообщено Раймоханом и Паланикумаром [21]. Они изучили влияние параметров обработки на осевое усилие, шероховатость поверхности и высоту шероховатости. Методы RSM были применены для получения набора оптимизированных параметров процесса. Кришнан и Самуил [22] применил искусственную нейронную сеть (ANN) и метод нейро-нечеткого вывода для оптимизации MRR и шероховатости поверхности в WEDT-процессе. Измерение твердости и шероховатости поверхности титанового сплава во время операции по покрытию шаром было сообщено Revankar et al. [23]. Для оптимизации поверхностной твердости и шероховатости были учтены параметры процесса, такие как полирование и скорость подачи. Поверхностные остаточные напряжения были измерены Jafarian et al. [24] после обычного поворота инконеля 718. Они использовали машину XRD для измерения остаточного напряжения на растяжение. Далее исследовано влияние параметров процесса на остаточные напряжения. Boud [25] проанализировал текстуру поверхности и остаточные напряжения на поверхности алюминия 7475 во время обработки AWJ. Они сообщили о наличии сжимающих остаточных напряжений на обрабатываемой поверхности, что улучшает усталостную долговечность заготовки. Hloch et al. [26] оценил тангенциальный поворот титана класса 3 с помощью AWJ. Сообщалось о значениях шероховатости и топографических объяснениях при изменении скорости хода от 1,5 до 7,5 мм / мин при сохранении других параметров. Srinivasu и Axinte [27] описали фрезерование композитных материалов методом простой гидроабразивной обработки и объяснили целостность созданной поверхности. Vaki et al. [28] описал влияние параметров процесса точения WED на MRR и шероховатость поверхности титанового сплава Ti-6Al-4V. Серый реляционный анализ и метод ANOVA были применены для отображения взаимосвязи между параметрами процесса и выходными ответами. Lehoska et al. [6] исследовал качество обрабатываемых поверхностей медного сплава с точки зрения поверхностных топографических и морфологических наблюдений во время пульсирующей гидроабразивной резки. Вычислены параметры шероховатости профиля поверхности, такие как Ra, Rq и Rz. Сообщалось также о измерении твердости и прочности на растяжение, чтобы характеризовать обрабатываемые поверхности. Характеристики поверхности и измерение шероховатости Al-6082 методом абразивной гидроабразивной обработки были выполнены Kartal et al. [29]. Было рассмотрено влияние параметров процесса, таких как скорость подачи сопла, массовый расход абразивного материала, расстояние отстоя и скорость шпинделя, чтобы обсудить качество поверхности с точки зрения значений шероховатости. Srivastava et al. [30] провели экспериментальное исследование процесса электроэрозионной обработки на MMC Al2024 / SiC и сообщили о влиянии параметров процесса на реакции, такие как шероховатость поверхности и MRR. Srivastava et al. [31] обеспечил всестороннюю разработку в области нетрадиционной обработки на композитных материалах. Они также обсудили достоинства и недостатки проводного EDM и AWJ процесса над другими обычными и нетрадиционными методами, касающимися производительности обработки. Srivastava et al. [32] обсудил поворот AWJ гибридной MMC для оценки целостности поверхности путем изменения скорости перемещения. Они сообщили о элементах целостности поверхности, таких как параметры шероховатости, визуализация

3D-поверхности, топография поверхности и морфология поверхности. Mouralova et al. [33] сравнил морфологические и топографические различия между четырьмя различными поверхностями, создаваемыми процессом EDM. Они также применили пять типов процесса термообработки для дальнейшего обсуждения изменений микроструктуры. Lehoska et al. [7] сравнил поверхностную целостность меди (CW004A) и латуни (CW614N) после акустически усиленной импульсной гидроабразивной резки. Обсуждается усиление поверхностных и подповерхностных слоев. Оптическая профилометрия была использована для обсуждения топографических описаний. Mouralova et al. [34] обработал чистый алюминиевый сплав проводным EDM и обсудил морфологию поверхности с помощью изображений SEM и топографию с помощью трехмерного профилометра. Они также обсуждают о недрах, включая слои перестройки. Kumar et al. [35] работал над абразивной гидроабразивной обработкой композитов из карбида алюминия / вольфрама. Они обсуждают влияние параметров процесса на результаты обработки, а также изменения микроструктуры. Шривастава [36] исследовал влияние прядения на аустенитную нержавеющую сталь с помощью ультразвуковой пульсирующей гидроабразивной струи. Элементы целостности поверхности, такие как остаточные напряжения, микротвердость и топографические исследования, выполнялись при изменяющихся скоростях перемещения от 0,25 мм / сек до 2 мм / сек. В приведенной выше литературе можно сделать вывод о том, что процессы, такие как WED и AWJ, все еще нуждаются в детальном изучении для точных решений, таких как улучшенная целостность поверхности и лучшие выходные ответы.

Целью настоящего исследования является изучение сравнительной эффективности процесса WED и AWJ при вращении гибридного алюминия MMC A359 / Al₂O₃ / В₄С. Он включает сравнение изменения микротвердости и остаточных напряжений через глубину под обработанной поверхностью. Другие элементы поверхностной целостности, такие как подробное исследование параметров профиля шероховатости поверхности (Ra, Rq и Rz) и 3D-визуализации поверхности с помощью оптического профилометра, 2D и 3D-рельефа поверхности с помощью конфокального микроскопа Olympus Iext и морфологии поверхности FE- SEM-изображения также обсуждаются для описания качества поверхности.

2. Экспериментальная процедура

Для экспериментальной работы в качестве материала матрицы используется алюминиевый сплав А359, тогда как частицы Al₂O₃ и В₄С выбраны в виде дисперсной фазы (армирование). Химический состав алюминиевого сплава А359 приведен в [таблице 1](#), а термофизические свойства всех выбранных компонентов гибридной MMC приведены в [таблице 2](#). Процесс изготовления гибридной MMC осуществляется методом электромагнитного перемешивания литья жидкой металлургии [32]. Подробное исследование электромагнитного перемешивания изготовления MMC приведено в одной из наших опубликованных работ [2], Подкрепления добавляют в пропорции 2% по весу в фазе матрицы во время смешивания. После проверки механических свойств результаты испытанных гибридных MMC показаны в [таблице 3](#).

Таблица 1 . Химический состав A359 [2] , [32] .

Элемент	си	Cu	Mg	Миннесота	Fe	Zn	Ti	Al
%возраст	8,5-9,5	0.2	0,5-0,7	0,1	0.2	0,1	0.2	остальной

Таблица 2 . Термофизические свойства сплава A359 Al₂O₃ и B₄C [32] .

	Плотность (г / см3)	Теплопроводность W / мК	Удельный вес (г / см3)	Точка плавления °С
A359	2,66	152	2,68	600
Al ₂ O ₃	3,2	100	3,7	2072
B ₄ C	2,52	30-42	2,51	2445

Таблица 1 . Химический состав A359 [2] , [32] .

Таблица 2 . Термофизические свойства сплава A359 Al₂O₃ и B₄C [32] .

	Плотность (г / см3)	Теплопроводность W / мК	Удельный вес (г / см3)	Точка плавления °С
A359	2,66	152	2,68	600
Al ₂ O ₃	3,2	100	3,7	2072
B ₄ C	2,52	30-42	2,51	2445

Таблица 3 . Основные физические и механические свойства испытуемого гибридного ММС A359 / Al₂O₃ / B₄C [32] .

компонентный	Плотность (г / см ³)	Сила (МПа)	Твердость (HRC)	Теплопроводность (Вт / мК)	Прочность (Дж / м ²)
A359	2,723		54,4	136	10,1
Al ₂ O ₃ / B ₄ C		19,2			

Для сравнительного исследования выбраны два типа поворота WED-поворота и поворот AWJ. Процесс поворота WED выполняется на Maxicut eМашина для электроразрядной резки с ЧПУ, изготовленная Electronica machine tool Ltd. Время импульсов, время выключения импульсов, напряжение зазора, подача проволоки, натяжение проволоки и количество оборотов (об / мин) доступны в виде переменных параметров процесса. Рабочий диапазон поворота WED составляет 400 мм, 300 мм и 225 мм в направлениях X, Y и Z соответственно с максимальной скоростью вращения 700 об / мин и скоростью подачи проволоки 10 мм / мин. Машина может самостоятельно отрегулировать скорость движения при обработке. Процесс поворота AWJ выполняется абразивным гидроабразивным CNC WJ2020B-1Z D производства PTV. Массовый расход абразивного материала, скорость перемещения, скорость вращения, дистанция простоя, давление воды - доступные переменные параметры процесса поворота AWJ. Машина может работать в диапазоне 2000 мм, 2000 мм и 300 мм в X, Y и Z соответственно с

максимальной скоростью вращения 1000 об / мин, скоростью хода 20 м / мин и точностью разреза 0,03 мм. Схематический механизм поворота обоих типов процессов показан в Рис . Во время операции поворота эффект скорости вращения был выбран для изучения качества поверхности, а также эффективности обработки для обоих типов процессов. В обоих процессах обработки для исследования значительного эффекта был выбран аналогичный диапазон скорости вращения, такой как 200 об / мин, 400 об / мин и 600 об / мин. Другие параметры обработки сохраняются как константа, которая показана в таблице 4 .

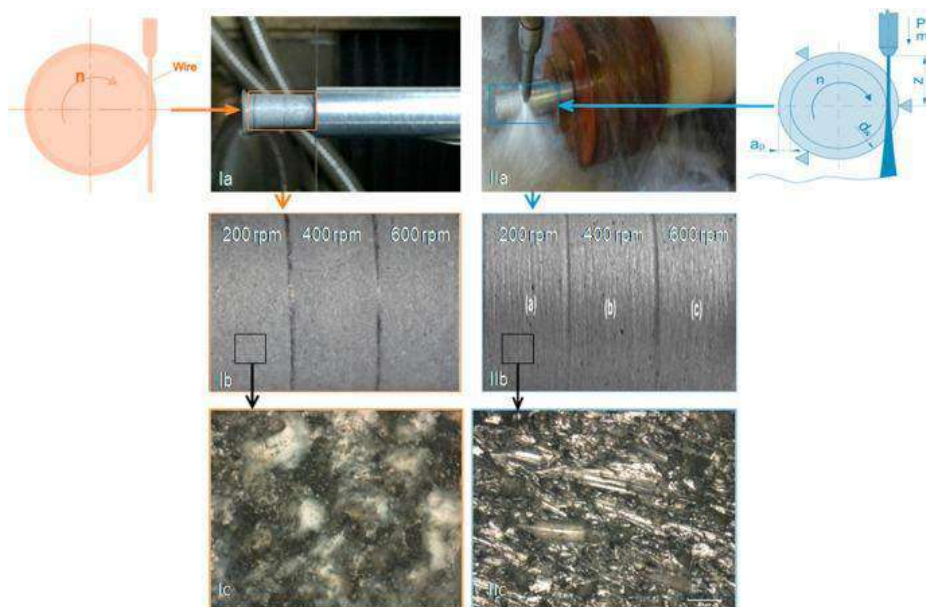


Рис . Механизм поворота (I) Процесс разворота электрического разряда (II) AWJ, превращающий процесс.

Таблица 4 . Технологические условия поворота.

параметры	Ценности	параметры	Ценности
Поворот WED		AWJ-поворот	
Рабочий цикл (τ)	0,55	Давление воды (p) (МПа)	400
Напряжение разрыва (V) (v)	60	Скорость перемещения (v) (мм / мин)	10
Число оборотов (n) (об / мин)	200, 400, 600	Число оборотов (n) (об / мин)	200, 400, 600
Диаметр детали (d) (мм)	20	Диаметр детали (d) (мм)	20
Глубина разреза (a _p) (мм)	2	Глубина разреза (a _p) (мм)	2
Диаметр проволоки (d _w)(мм)	0,25	Массовый расход абразивного материала (M _a) (г / мин)	400
Материал проволоки	Оцинкованная латунь	Диаметр сопла (d ₀) (мм)	0,33
Подача проволоки	1	Диаметр	0.9

параметры	Ценности	параметры	Ценности
Поворот WED		AWJ-поворот	
(v) (м / мин)		фокусирующей трубы (d _f) (мм)	
Напряжение проводов (Kgf)	600	Расстояние срабатывания (z) (мм)	9
Проводимость деионизованной воды (S)	13mho	Положение режущей головки φ (°)	90
Верх потока (LPM)	6	Абразивный	Австралийский гранат
Нижнее дно (LPM)	6	Размер (MESH)	80 (180 мкм)

В контексте измерения качество обрабатываемых поверхностей сравнивалось с точки зрения изменения микротвердости и остаточных напряжений на поверхности, созданной, а также в недрах. Измерение теста на микротвердость проводят с помощью теста вдавливания Виккерса при нагрузке 100 г в течение 10 с с помощью твердомера Vickers (ECONOMET VH-1MD, изготовленного из Ченнаи Метко) на обработанной поверхности, а также в недрах. При анализе подповерхностного слоя остаточное напряжение также измерялось с помощью рентгеновской дифракционной машины GIXRD. В своей работе рентгеновское излучение концентрируется для взаимодействия с поверхностью образца, оно создает дифрагированные лучи, которые следуют закону Брэгга $n\lambda = 2d\sin\theta$. Где λ - длина волны, θ - угол дифракции, d - интервал решетки, называемый d -интервалом. Математическое отношение $d \text{ Vs } \sin^2\alpha$ (значения, полученные на машине XRD), затем используется для вычисления остаточной деформации ϵ . Остаточные напряжения измеряются по закону Хука, принимая при этом модуль молодости 113 ГПа и коэффициент отравления 0,275, сообщенный при испытании на растяжение развитой гибридной MMC. Профиль глубины образца был получен путем полировки и травления ультратонких поверхностных слоев до примерно 250 мкм в обоих исследованиях. Исследование также включает топографические и морфологические исследования, чтобы описать сравнение обоих типов созданных поверхностей. Шероховатость поверхности (R-Roughness Average, Rq-Root Mean Square (RMS) Шероховатость и Rz-Средняя максимальная высота профиля) измерялась с помощью бесконтактного тестера для определения шероховатости MicroProf FRT оптического профилометра. Все измерительные поверхности были отсканированы на пяти одинаково смещенных измерительных линиях, параллельных оси вращения, (Программное обеспечение сканирования изображений). Также были зафиксированы и зафиксированы значения шероховатости поверхности и графики вместе с 3D-графикой. 3D-график поверхности выполнен встроенным датчиком SEN 000 03. Другие основные параметры измерения оптического профилометра показаны в [таблице 5](#).

Таблица 5 . Параметры измерения шероховатости (EN ISO 4287).

параметры	Поворот WED	AWJ-поворот
Отключение фильтра шума s (мкм)	8	8
Длина волны отсечки λc (мм)	2.5	2.5

параметры	Поворот	AWJ-
	WED	поворот
Количество отсечек (-)	2	3
Длина выборки l_r (мм)	2.5	2.5
Длина оценки l_n (мм)	5	5

MRR также рассчитан для обсуждения времени цикла в каждой операции. Максимальный MRR с минимальными ресурсами является желательным результатом любого процесса обработки. Его можно рассчитать, измеряя время поворота в каждом из экспериментов при заданном наборе скорости вращения. Математически это можно вычислить по следующему уравнению. (1). Где D - исходный диаметр, d - конечный диаметр, l - длина обработки, t - время обработки.

$$(1) MRR_{\text{знак равно}} \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) L \times T \text{ мм}^3/\text{мин}$$

Топографические детали были проанализированы и качественно объяснены лазерным конфокальным микроскопом OLYMPUS Lext OLS 3100. Изображения FE-SEM были захвачены машиной FE-SEM (Zeiss Supra 55), чтобы объяснить сравнительную разницу между поверхностными дефектами на обоих типах поверхности.

3. Результат и обсуждение

Оба режима WED и AWJ были успешно применены на гибридной ММС. Поверхности повернутого образца показаны на [фиг.1](#) (Ib и IIb). При визуальном наблюдении поверхности не были глянцевыми в режиме поворота WED из-за термического разложения, и не было присутствия какой-либо конкретной текстуры или рисунка поверхности. Увеличивая скорость вращения, поверхность, казалось, улучшалась и более точно заканчивалась. Однако поверхность поворота AWJ была слегка волнистой и отмечена несколькими режущими следами переменной длины и ширины, но имела глянцевую отделку. При более низкой скорости вращения эти следы наблюдались в большом количестве, и они наблюдались как прямые, так и изогнутые, ориентированные наклонно к направлению струйного потока. Пористость поверхности и пустоты были обнаружены на обоих типах повернутых поверхностей. В процессе поворота WED это происходит из-за плавления и испарения материала матрицы. Он имеет тенденцию ослаблять интерфейсное соединение между армированием и матричной фазой, что, в свою очередь, приводит к смещению частиц вместе с давлением диэлектрической прослойки. В процессе поворота AWJ это происходит из-за падения высокоскоростного абразива вместе с гидроструйной машиной на обрабатываемой поверхности, что приводит к пластической деформации, а также вытягиванию твердых частиц с поверхностей. Сравнивая поверхности других аналогичных материалов, было отмечено, что значения шероховатости ГМС достаточно велики из-за наличия поверхностных дефектов, таких как пористость и пустоты, и уровень этих дефектов зависит от типов обработки это связано с падением высокоскоростного абразива вместе с гидроструйной машиной на обрабатываемой поверхности, что приводит к пластической деформации, а также вытягиванию твердых частиц с поверхностей. Сравнивая поверхности других аналогичных материалов, было отмечено, что значения шероховатости ГМС достаточно велики из-за наличия поверхностных дефектов, таких как пористость и пустоты, и уровень этих дефектов зависит от типов обработки[37].

Экспериментально исследовано изменение микротвердости и остаточных напряжений для обоих типов процессов при заданном наборе скорости вращения. Первоначально микротвердость образца наблюдалась до 200 HV перед обработкой. Измерение микротвердости началось с фиксированной глубины углубления на 20 мкм от обрабатываемой поверхности. Рисунок 2(а-с) показывает изменение микротвердости с глубиной от обрабатываемой поверхности. Из графика видно, что для процесса WED значения микротвердости на глубине около 20 мкм были найдены 165 HV, 176 HV и 185 HV при 200 об / мин, 400 об / мин и 600 об / мин, соответственно. По-видимому, он имеет более низкую твердость, чем у гибридной гибридной ММС. Это объясняется уменьшенной твердостью слоя recast. Пористость и микроотверстия в реконструированном литом слое (до 25 мкм) были высокими при высокой энергии разряда, которая, как правило, уменьшала твердость. Другой причиной является окисление элементов передовых слоев, таких как цинк, медь и латунь, что снижает его твердость [38]. По мере увеличения скорости вращения доступность энергии разряда на единицу круговой длины заготовки уменьшается. Это уменьшает толщину слоя recast, и, следовательно, микротвердость показала улучшенную тенденцию. По мере того как глубина увеличивается за пределами слоя перестройки, микротвердость обрабатываемой поверхности увеличивается примерно на 10-15% по сравнению с глубиной до 250 мкм. Это связано с микроструктурными изменениями обрабатываемых поверхностей в процессе эрозии. Однако эти приращения были обнаружены пренебрежимо малыми после глубины 250 мкм. В случае AWJ-процесса была обнаружена низкая вариация микротвердости. Диапазон варьируется примерно на 7-9% выше, чем значение микротвердости литого гибридного композита перед обработкой. Это связано с тем, что микроструктурные изменения незначительны в случае AWJ-процесса из-за работы холодной резки. Тем не менее, из-за незначительных изменений фаз, значения микротвердости возрастают до определенного предела. Следовательно, этот процесс имеет преимущество в отношении минимальной вариации твердости и изменений микроструктуры. Аналогичный диапазон изменения микротвердости также сообщался другими исследователями [36], [39], [40]. Увеличивая скорость вращения, значения уменьшались на каждом слое поверхности.

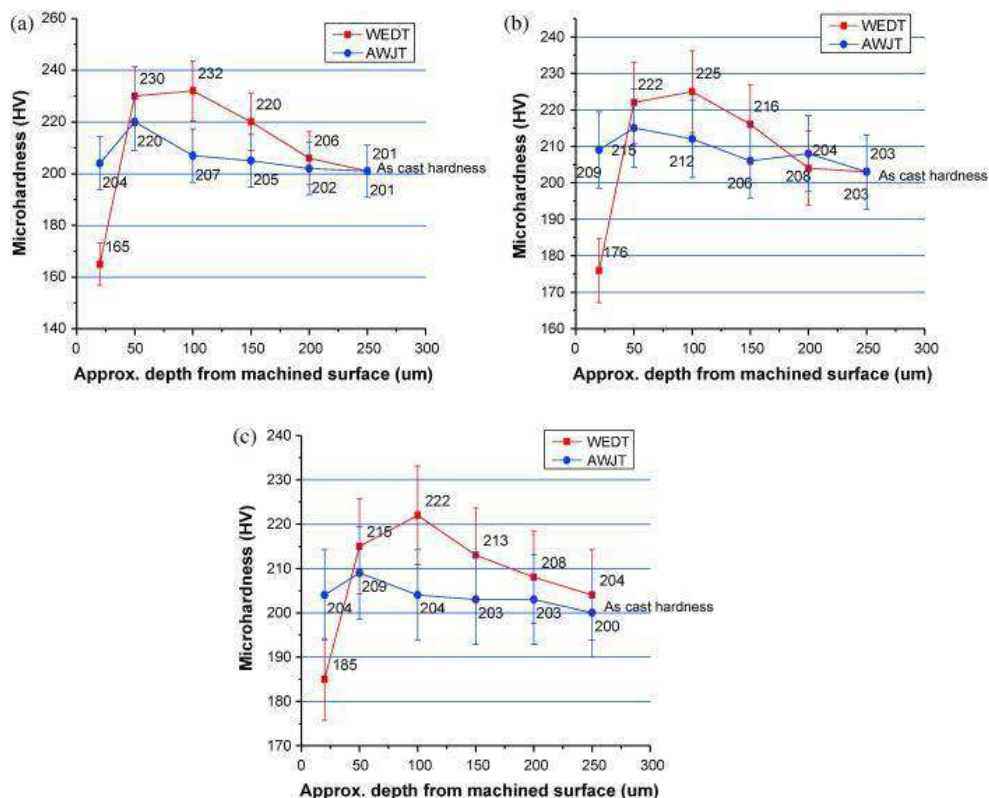


Рис. 2 Изменение микротвердости с глубиной под обработанной поверхностью.

Формирование остаточных напряжений зависит от типа процессов, таких как тепловые деформации, остаточные напряжения растягиваются, тогда как в нетермических процессах возникают сжимающие напряжения [38], [39]. Результаты остаточных напряжений на глубине от обрабатываемой поверхности в обоих типах выбранных методов показаны на рисунке 3(а-с). Наблюдается, что остаточные напряжения растяжения были обнаружены в случае процесса WED из-за процесса термической эрозии. Это объясняется тем, что термические напряжения индуцируются в зоне термического воздействия или перерабатывают слой обрабатываемой поверхности. Однако с увеличением глубины от поверхности к сердечнику заготовки эффект процесса термической эрозии уменьшается и становится незначительным. Это приводит к первоначальному остаточному напряжению как литой гибридной MMC, которая была сжимающей по своей природе около глубины 250 мкм. Максимальное остаточное напряжение растяжения в процессе WED было найдено 340 МПа на глубине 20 мкм и скоростью вращения 200 об / мин. Рисунок 3 также указывает на тенденцию к уменьшению при увеличении скорости вращения. Это связано с тем, что при более низкой скорости вращения имеется максимальная энергия разряда на единицу площади окружности в единицу времени, которая имеет тенденцию к увеличению зоны термического воздействия и температурных напряжений. Аналогичные исследования были также сообщены другими авторами [39]. В случае процесса AWJ сжимающие остаточные напряжения обнаруживаются из-за эффекта пиннинга и никакой роли теплообразования. Отмечается также, что с увеличением скорости вращения происходит снижение тенденции остаточных напряжений. При более высокой скорости вращения пластическая деформация сравнительно мала из-за меньшего количества абразивных частиц на единицу окружности вращающейся заготовки. Однако с увеличением глубины за пределами 250 мкм от поверхности к сердечнику заготовки эффект пластической деформации становится незначительным. Максимальное остаточное напряжение для процесса поворота AWJ было найдено -285 МПа соответственно при 50 мкм. Другие исследователи также сообщили о генерации сжимающих остаточных напряжений в подповерхностях AWJ-процесса [36], [40].

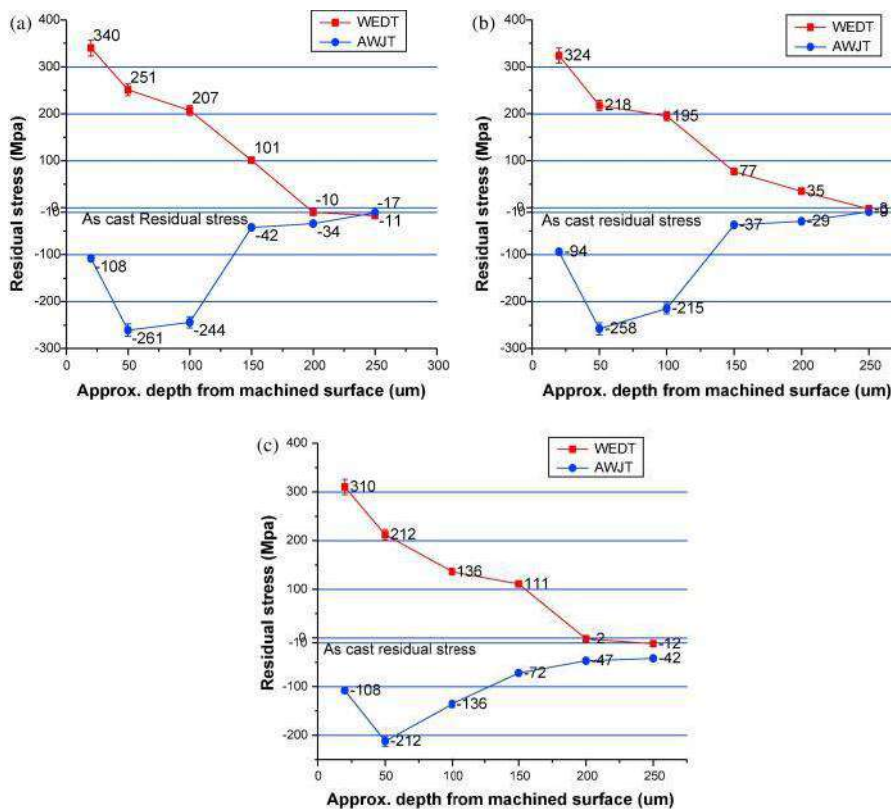


Рисунок 3 . Формирование остаточного напряжения с глубиной под обработанной поверхностью.

Отчет о шероховатости генерируется оптической профилометрией в обоих процессах поворота. Три были измерены параметры шероховатости Ra, Rq и Rz, и их тенденция показана на рис. 4а , фиг. 4 , б , рис. 4с при заданном наборе скорости вращения 200, 400 и 600 оборотов в минуту соответственно. На рисунке 4 (а) показан тренд средней шероховатости поверхности (Ra) для каждого процесса поворота при заданном наборе скорости вращения. На графике видно, что лучшая поверхностная отделка может быть найдена при увеличении тенденции скорости вращения в обоих процессах поворота. Аналогичная картина наблюдалась и для других параметров шероховатости (Rq и Rz) , как показано на рис. 4б , рис. 4в. В случае поворота WED Ra изменяется от 4,88 до 6,17 мкм, тогда как в случае поворота AWJ он колеблется от 5,99 до 8,27 мкм. В этих диапазонах можно констатировать, что в случае поворота AWJ была проведена грубая резка по сравнению с процессом поворота WED. Шероховатый разрез в случае AWJ-процесса связан с удалением абразивных частиц на поверхности заготовки. Это связано с пластической деформацией, при которой материал удаляется вспашкой. Другой причиной грубой резки является создание длинных неглубоких канавок на обработанной поверхности, что связано с прохождением абразивной струи воды из пор. При более высокой скорости вращения время взаимодействия поверхности с абразивными частицами уменьшается, когда струя быстро проходит поверхность без эффективной эрозии. Следовательно, он уменьшает вспашку и шероховатость поверхности обрабатываемой поверхности. Однако диаметрическое отклонение возрастает и образуется ступенчатый поворот подобно поверхности. В случае поворота WED давление промывки деионизированной воды помогает удалить мусор и лишний материал. Но из-за быстрого охлаждения скорость затвердевания неравномерна, что приводит к несколько более высокому уровню шероховатости поверхности. Было также отмечено, что при увеличении скорости вращения поверхность имеет улучшающуюся тенденцию. Это связано с тем, что при более высокой скорости вращения длина окружности заготовки, проходящая через искровую зону, увеличивается в единицу времени, но энергия импульса (во время включения импульса) остается одинаковой для того же интервала времени. Таким образом, образование искровой зоны уменьшается, что уменьшает грубую резку. диаметрическое отклонение возрастает и образуется ступенчатый поворот как поверхность. В случае поворота WED давление промывки деионизированной воды помогает удалить мусор и лишний материал. Но из-за быстрого охлаждения скорость затвердевания неравномерна, что приводит к несколько более высокому уровню шероховатости поверхности. Было также отмечено, что при увеличении скорости вращения поверхность имеет улучшающуюся тенденцию. Это связано с тем, что при более высокой скорости вращения длина окружности заготовки, проходящая через искровую зону, увеличивается в единицу времени, но энергия импульса (во время включения импульса) остается одинаковой для того же интервала времени. Таким образом, образование искровой зоны уменьшается, что уменьшает грубую резку. диаметрическое отклонение возрастает и образуется ступенчатый поворот как поверхность. В случае поворота WED давление промывки деионизированной воды помогает удалить мусор и лишний материал. Но из-за быстрого охлаждения скорость затвердевания неравномерна, что приводит к несколько более высокому уровню шероховатости поверхности. Было также отмечено, что при увеличении скорости вращения поверхность имеет улучшающуюся тенденцию. Это связано с тем, что при более высокой скорости вращения длина окружности заготовки, проходящая через искровую зону, увеличивается в единицу времени, но энергия импульса (во время включения импульса) остается одинаковой для того же интервала времени. Таким образом, образование искровой зоны уменьшается, что уменьшает грубую резку. давление промывки деионизированной воды помогает удалить мусор и избыточный материал. Но

из-за быстрого охлаждения скорость затвердевания неравномерна, что приводит к несколько более высокому уровню шероховатости поверхности. Было также отмечено, что при увеличении скорости вращения поверхность имеет улучшающуюся тенденцию. Это связано с тем, что при более высокой скорости вращения длина окружности заготовки, проходящая через искровую зону, увеличивается в единицу времени, но энергия импульса (во время включения импульса) остается одинаковой для того же интервала времени. Таким образом, образование искровой зоны уменьшается, что уменьшает грубую резку. давление промывки деионизированной воды помогает удалить мусор и избыточный материал. Но из-за быстрого охлаждения скорость затвердевания неравномерна, что приводит к несколько более высокому уровню шероховатости поверхности. Было также отмечено, что при увеличении скорости вращения поверхность имеет улучшающуюся тенденцию. Это связано с тем, что при более высокой скорости вращения длина окружности заготовки, проходящая через искровую зону, увеличивается в единицу времени, но энергия импульса (во время включения импульса) остается одинаковой для того же интервала времени. Таким образом, образование искровой зоны уменьшается, что уменьшает грубую резку. чистота поверхности показала улучшающуюся тенденцию. Это связано с тем, что при более высокой скорости вращения длина окружности заготовки, проходящая через искровую зону, увеличивается в единицу времени, но энергия импульса (во время включения импульса) остается одинаковой для того же интервала времени. Таким образом, образование искровой зоны уменьшается, что уменьшает грубую резку. чистота поверхности показала улучшающуюся тенденцию. Это связано с тем, что при более высокой скорости вращения длина окружности заготовки, проходящая через искровую зону, увеличивается в единицу времени, но энергия импульса (во время включения импульса) остается одинаковой для того же интервала времени. Таким образом, образование искровой зоны уменьшается, что уменьшает грубую резку.

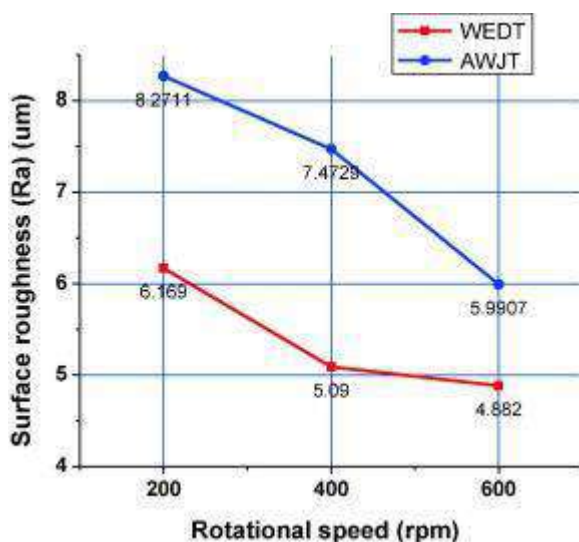


Рис.4а . Шероховатость поверхности (Ra) при 200 об / мин.

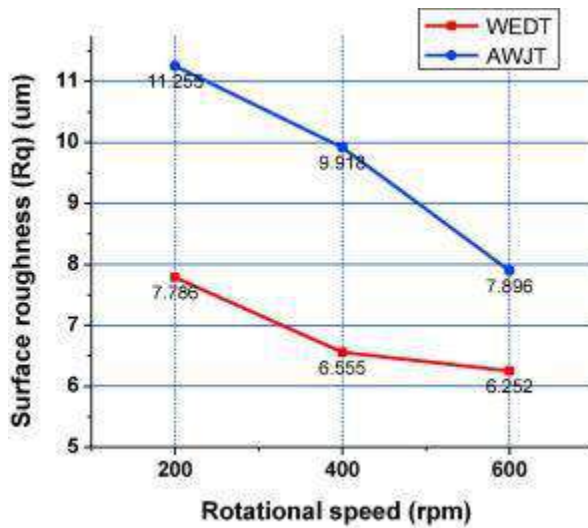


Рис.4б . Шероховатость поверхности (Rq) при 400 об / мин.

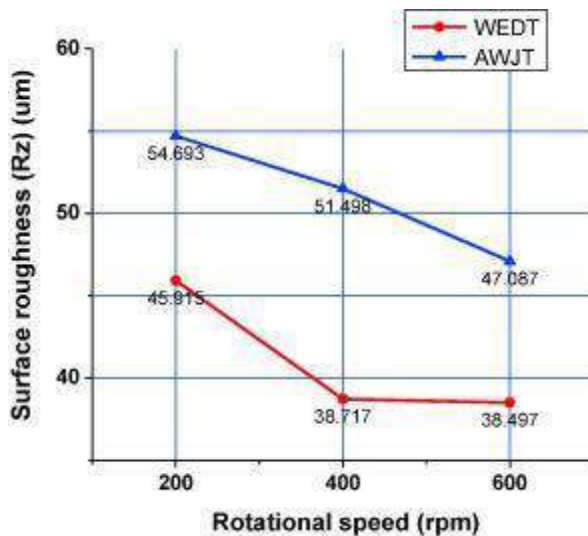


Рис.4с . Шероховатость поверхности (Rz) при 600 об / мин.

Рис. 5а , рис. 5 , б показывает влияние скорости вращения на МРВ. Для процесса поворота AWJ (рис.5а) МRR варьируется от 659 мм³ / мин до 425 мм³ / мин, тогда как при повороте WED (рис.5б) он наблюдался в диапазоне от 32,5 мм³ / мин до 19,5 мм³ / мин, что показывает медленный процесс удаления материала по сравнению с поворотом AWJ. Это связано с тем, что скорость поперечной резки может быть отрегулирована в AWJ-процессе и может рассматриваться как переменный параметр процесса в пределах максимального диапазона 20 м / мин. Однако в случае поворота WED сама машина регулирует скорость движения, и она наблюдалась в диапазоне 0,1-0,3 мм / мин. Благодаря этому требуется больше времени для машины по сравнению с поворотом AWJ. Однако поворот WED обеспечивает лучшую точность поверхности по сравнению с процессом поворота AWJ без отклонений в размерах и низкой массой материала заготовки по сравнению с более крупным удалением в AWJ-процессе. По этим результатам можно констатировать, что поворот WED обеспечивает лучшую чистоту поверхности, но при низком МRR. Однако поворот AWJ применим для большого МRR, но при грубой резке.

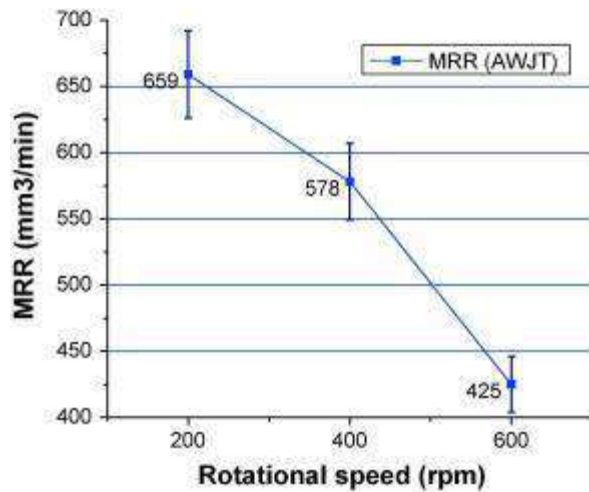


Рис.5а . MRR Vs скорость вращения AWJT процесса.

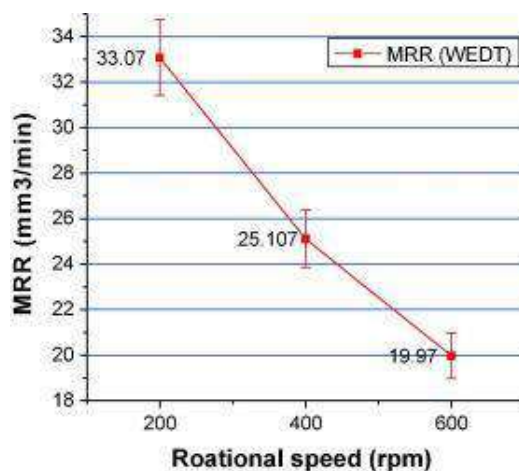


Рис.5б . MRR Vs скорость вращения процесса WEDT.

Оптический профилеометр также использовался для захвата поверхностей, созданных процессом поворота WED и AWJ. Рисунок 6(a-c) показывает трехмерную визуализацию поверхностей поворота WED. Поверхность кажется относительно однородной без каких-либо режущих следов, меток инструмента, конкретной текстуры или рисунка. В процессе поворота WED наблюдается слегка шероховатая поверхность. Это объясняется тем, что в процессе термической эрозии нефизическая поверхность контакта расплавляется и испаряется из-за действия искрообразования и энергии разряда. Избыточный материал или мусор затем промывают диэлектрической жидкостью. Следует отметить, что во время отсутствия искровой зоны затвердевание слоя перестройки является неоднородным, что создает несколько пиков и долин. Однако мелкомасштабная пористость, а также пустоты наблюдались на поверхностях, которые следуют за уменьшающимися тенденциями с более высокой скоростью вращения (рис.6c). Отчет о грубости уже объяснил, что при более низкой скорости вращения шероховатость поверхности выше. На этом этапе упрочняющие частицы, которые трудно вырезать и попали на путь проволочного электрода, вырвались из своего места и образовали пустоты на поверхности заготовки из-за плавления и промывки диэлектрической жидкостью. На рисунке 6 (d-f) показана 3D-визуализация поверхностей AWJ. Поверхность, похоже, полна режущих следов и слегка волнистая. Это связано с изгибом струи воды, проходящей через поры, что приводит к образованию длинных мелких борозд на поверхности. При более высокой скорости вращения (фиг.6e) время для правильного взаимодействия между абразивными частицами и материалом меньше. Благодаря тому, что струя быстро проходит поверхность материала, не вызывая должной эрозии материала и, следовательно, образование следов резания, а глубокие кратеры меньше, что делает поверхность гладкой. Другим важным фактором для этих

поверхностных дефектов является процент добавления подкреплений. Из-за дефекта, такого как кластеризация твердых армирующих частиц в ММС, плавление металлического металла было затруднено и вытеснено в виде хрупкого разрушения и создало пустоты [37] .

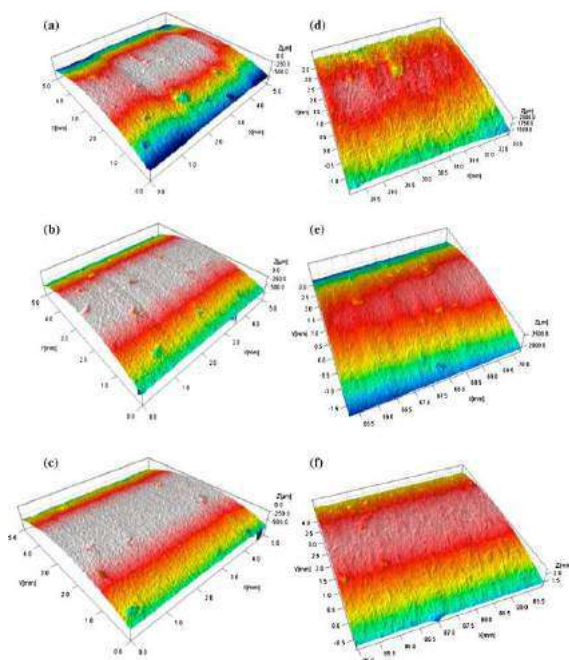


Рис . 3D-визуализация поверхностей, создаваемых WED и AWJ, поворот на (a, d) 200 об / мин (b, e) 400 об / мин (c, f) 600 об / мин [41] .

На рисунке 7 (a-c) показаны трехмерные топографические изображения поворотных поверхностей WED на каждом наборе скорости вращения. Изображения показали плавление и повторное затвердевание поверхностей во время процесса. Изображения показывают неравномерное плавление поверхности из-за явления термической эрозии. Материал заготовки плавится и повторно затвердевает для создания кратеров, пиков и долин на всей обрабатываемой поверхности. Изображения показывают четкий вид рельефа поверхности и неровностей при заданном наборе скоростей вращения. Эти долины и кратеры в основном ответственны за шероховатость материала. Небольшие микротрещины также наблюдались на неровных поверхностях из-за неравномерного охлаждения поверхности. Кроме того, часть материала проволоки также осаждается на поверхности заготовки. Рисунок 7(d-f) показаны 3D-топографические изображения AWJ, подвергнутых обработке поверхностей. На поверхностных изображениях наблюдались следы резания, вызванные абразивными частицами. Следы кажутся почти субпараллельными и ориентированы незначительно наклонно к направлению потока струи воды. Эта ориентация вызвана прогибом движущегося AWJ в контакте с обработанным материалом. По следам создаются небольшие роши. Некоторые из следов перекрываются или пересекаются с другими трассами. Ведущая часть широких режущих трасс врывается в заготовку. Изолированные абразивные зерна, застрявшие на поверхности, можно встретить спорадически. В некоторой части поверхности расположены находящиеся темно-серые частицы усиливающих компонентов (со средним размером 50 мкм), а также многочисленные ямы, вызванные вырыванием частиц из металлической матрицы. Сравнение всех поверхностей, создаваемых поворотом WED и AWJ. Было обнаружено, что поверхности, полученные методом AWJ, являются неоднородными и нерегулярными по сравнению с поворотом WED. Некоторые сходства, такие как создание пиков, долин и поверхностных трещин, наблюдались как на обработанных поверхностях, создаваемых обоими процессами.

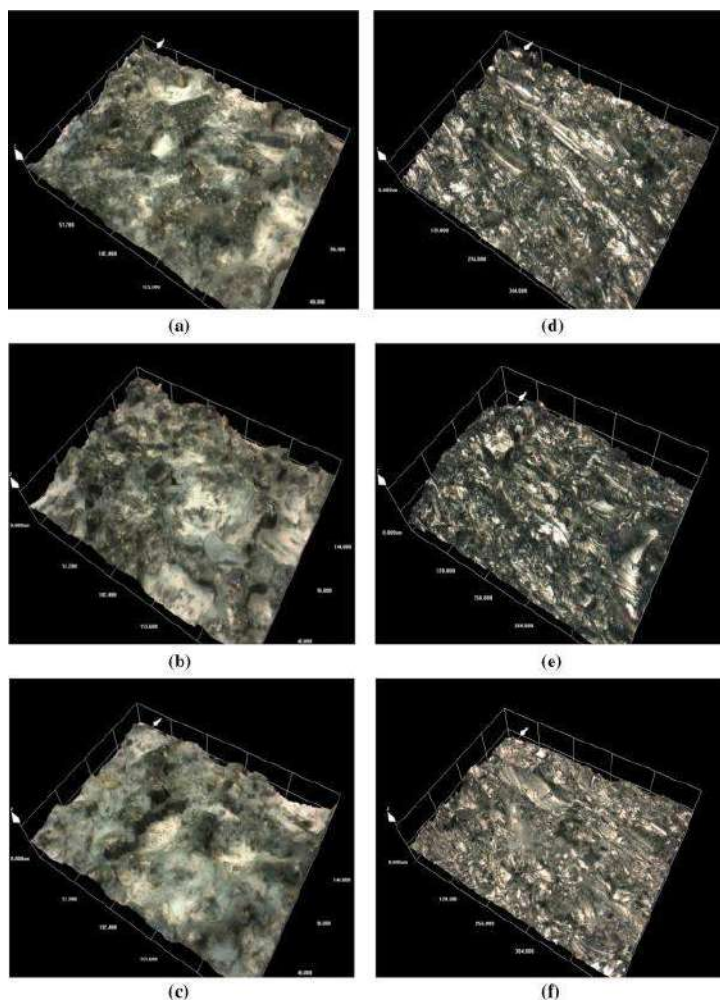


Рисунок 7 . Поверхностная топография поверхностей поворота WED и AWJ (a, d) 200 об / мин, (b, e) 400 об / мин, (c, f) 600 об / мин (лазерный конфокальный микроскоп Olympus Lext OLS 3100, MPlanFL N 20 × / 0,45 BD и MPlanFL N 50 × / 0,80 BD линз) [41] .

Кроме того, сравнительный анализ на микроскопическом уровне был выполнен с помощью изображений FE-SEM. Фиг.8 , фиг.10 показаны изображения FE-SEM поверхностей поворота WED и AWJ тестируемых гибридных MMC соответственно. Поверхности были выбраны случайным образом для обоих типов процессов, чтобы показать разницу в поверхностных дефектах. Изображения FE-SEM поверхности WED повернули, описав плавление и испарение обрабатываемой поверхности, ухудшение поверхностных и поверхностных дефектов, таких как кратеры, микротрещины и полости. На обрабатываемой поверхности наблюдаются некоторые сферические узелки (капли) повторно затвердевших металлов. Это связано с неравномерной скоростью затвердевания и нанесением поверхностного натяжения, расплавленный металл не образует однородную фазу, и он проявляется отдельно в форме узелков. Поверхность повторно затвердевает и образует переработанный верхний слой (фиг.9).

4 . Заключение

Обработка гибридной MMC A359 / Al₂O₃ / B₄C была успешно выполнена с помощью процесса WED и AWJ, и образовались полные дефектные поверхности. Изменение скорости вращения играет значительную роль при определении типа процесса обработки. Некоторые важные моменты из сравнительных результатов заключаются в следующем:

1.

Поверхность WED с повернутой поверхностью имела тусклый вид из-за разложения повторно затвердевшего слоя, который подвержен термическому

воздействию, но поверхности не имеют какой-либо конкретной текстуры поверхности и режущих меток. Однако AWJ повернул образцы с поверхностью глянцевого типа и подвергся значительному количеству режущих следов, которые были неравномерно распределены по всей поверхности заготовки.

2.

Остаточные напряжения были обнаружены в природе в случае WED-процесса из-за термической эрозии, тогда как сжимающие остаточные напряжения были обнаружены в случае AWJ-процесса. Более низкая твердость наблюдалась в слое recast во время процесса WED, который увеличился на 10-15% выше, чем значение перед обработкой, за пределами толщины слоя перестройки и до 250 мкм. В процессе AWJ наблюдалось незначительное изменение микротвердости из-за незначительных микроструктурных изменений обрабатываемых поверхностей.

3.

Увеличивая скорость вращения, значения шероховатости уменьшаются. Значения шероховатости образцов WED были сравнительно выше, чем образцы AWJ. Однако поворот WED требует большего времени обработки из-за низкой скорости хода в диапазоне 0,1-0,3 мм / мин. Благодаря чему поворот WED оказывается медленным процессом удаления материала. Тем не менее, MRR увеличивается с уменьшением скорости вращения в обоих типах процесса поворота.

4.

Неровности поверхности вызваны неравномерным плавлением и повторным затвердеванием рабочего материала в случае поворота WED. Принимая во внимание, что в случае AWJ эрозия происходит при пластической деформации поверхности обработанной зоны. Поверхностные дефекты, такие как микроотверстия, кратеры, микротрещины, наблюдались сравнительно большим образом на поверхностях AWJ по сравнению с повернутыми поверхностями WED.

Настоящая работа послужила ориентиром для процедуры выбора процесса поворота для гибридных алюминиевых MMC или подобных твердых материалов. Он обеспечивает сравнительную дискуссию между результатами обработки, а также качеством поверхности. Однако настоящая работа ограничивается измерением поверхности, созданной только методами WED и AWJ. Другие нетрадиционные методы, такие как лазерная обработка, также могут быть взяты для целей исследования. Другие элементы целостности поверхности также могут изучить, чтобы обсудить более точное сравнение методов измерения и обработки.

Подтверждения

Эта работа поддерживается Индийским технологическим институтом (ISM), Дханбад, Индия. Авторы благодарны проекту Института экологически чистых технологий горного дела и использования сырья для использования в энергетике - Программа устойчивого развития, рег. нет. LO1406, финансируемого Министерством образования, молодежи и спорта Чешской Республики, и с поддержкой долгосрочного концептуального развития исследовательского учреждения RVO: 68145535. Эта работа также была поддержана VEGA1/0096/18. Эта работа была поддержана Словацким агентством исследований и разработок в соответствии с контрактом №. APVV-17-0490.

Рекомендации

[1] WS Miller, L. Zhuang, J. Bottema, A. Wittebrood, P. De Smet, A. Haszler, A. Vieregge. Последние разработки в алюминиевых сплавах для автомобильной промышленности

Mater. Sci. Eng. A, 280 (2000), стр. 37 - 49

[2]AK Srivastava, AR Dixit, S. Tiwari, 2016. Исследование микроструктурных и механических свойств композита металлической матрицы A359 / B4C с помощью электромагнитного перемешивания, 2016, 23 (апрель и июнь) 171-180.

[3]M. AsifТрибо-оценка композитов на основе металлических матриц на основе алюминия, используемых для применений автомобильных тормозных колодок
Plast. Polym. Technol. , 1 (2012) , стр. 9 - 14

[Просмотреть запись в Scopus](#)

[4]H. Blickwedel, NS Guo, H. Haferkamp, H. Louis, Предсказание характеристик абразивного струйного резания и качества, в: Proc. 9-й Международный. Symp. Jet Cut. Technol., 1990: pp. 163-179.

[5]F. Müller, J. Monaghan.Нестандартная обработка металлического матричного композита с частичной армией

Int. J. Mach. Инструменты Manuf. , 40 (2000) , стр. 1351 - 1366

[СтатьяЗагрузить PDFПросмотреть запись в Scopus](#)

[6]D. Lehoccka , J. Klich , J. Foldyna , S. Hloch , JB Krolczyk , J. Carach , GM Krolczy
к Распадмедных сплавов с использованием пульсирующей струи воды

Измерение , 82 (2016) , стр. 375 - 383

[СтатьяЗагрузить PDFПросмотреть запись в Scopus](#)

[7]D. Lehoccká , D. Klichová , J. Foldyna , S. Hloch , P. Hvizdoš , M. Fides , F. BotkoСравнение влияния акустически усиленной пульсирующей струи воды на выбранные характеристики целостности поверхности меди CW004A и латуни CW614N

Измерение , 110 (2017) , стр. 230 - 238

[СтатьяЗагрузить PDFПросмотреть запись в Scopus](#)

[8]R. M'Saoubi , JC Outeiro , H. Chandrasekaran , OW Dillon Jr , IS JawahirОбзор целостности поверхности при механической обработке и ее влияние на функциональные характеристики и срок службы обрабатываемых изделий

Int. J. Sustain. Произв. , 1 (2008) , стр. 203 - 236

[CrossRefПросмотреть запись в Scopus](#)

[9]ЖесткаяцелостностьJP Davimв механической обработке
Springer (2010)

[10]Т. Мазузава , М. Фуджино , К. Кобаяши , Т. СузукиИсследование бурения микроотверстий методом ЭДМ (электроразрядная обработка). Автоматическое формование электродов с помощью проводящего провода

Bull. Япон. Soc Precis. Eng. , 20 (1986) , стр. 117 - 120

[Просмотреть запись в Scopus](#)

[11]D. Arola , ML McCain , S. Kunaporn , M. Ramulu Waterjetи абразивная гидроабразивная обработка поверхности титана: сравнение текстуры поверхности и остаточного напряжения

Wear , 249 (2001) , pp. 943 - 950 , [10.1016 / S0043-1648 \(01\) 00826-2](#)

[СтатьяЗагрузить PDFПросмотреть запись в Scopus](#)

[12]S. Hloch , M. Gombár , J. ValicekАнализ абразивных гидроабразивных факторов, влияющих на шероховатость поверхности литого алюминия

Int. J. Precis. Technol. , 1 (2007) , стр. 1 - 10

[CrossRefПросмотреть запись в Scopus](#)

[13]MJ Haddad , AF TehraniИсследование цилиндрической разводки электрических разрядов (CWEDT) инструментальной стали AISI D3 на основе статистического анализа

J. Mater. Процесс. Technol. , 198 (2008) , стр. 77 - 85

[СтатьяЗагрузить PDFПросмотреть запись в Scopus](#)

[14]А. Мохаммади , А. Ф. Терани , Е. Еманян , Д. КаримиСтатистический анализ провода электрического разряда включения скорости съема материала

J. Mater. Процесс. Technol. , +205 (2 008) , стр. 283 - 289

- [Статья](#)[Загрузить PDF](#)[Просмотреть запись в Scopus](#)
[15]J. Valicek , M. Kusnerova , S. Hloch , K. Monkova Исследование поверхности и топографических параметров при абразивной гидроабразивной обработке с помощью оптических измерений
Int. J. Mach. Man. Mater. , 5 (2009) , с. 268 - 277
[CrossRef](#)[Просмотреть запись в Scopus](#)
- [16]V. Janardhan , GL SamuelPulse анализ данных поезда для исследования влияния параметров обработки на производительность процесса электроразрядной проводки (WEDT)
Int. J. Mach. Инструменты Manuf. , 50 (2010) , стр. 775 - 788
[Статья](#)[Загрузить PDF](#)[Просмотреть запись в Scopus](#)
- [17]MJ Haddad , F. Alihoseini , M. Hadi , M. Hadad , AF Tehrani , A. MohammadiЭкспериментальное исследование процесса течения электрического разряда цилиндрической проволоки
Int. J. Adv. Произв. Technol. , 46 (2010) , стр. 1119 - 1132
[CrossRef](#)[Просмотреть запись в Scopus](#)
- [18]K. Brillová , M. Ohlídal , J. Valíček , S. Hloch , D. Kozak , Ž. Ivandić.Оценка абразивной гидроабразивнойрезкипроизводится топографией поверхности титана методами спектрального анализа
Металлургия , 51 (2012) , стр. 39 - 42
[Просмотреть запись в Scopus](#)
- [19]M. Zeleňák , J. Valíček , J. Klich , P. ŽidkováСравнение качества шероховатости поверхности, создаваемого абразивной струей воды и резкой лазерного луча CO2
Дэ. Vjesn. , 19 (2012) , стр. 481 - 485
[Просмотреть запись в Scopus](#)
- [20]M. Rajkumar, M. Kanthababu, S. Gowri, Экспериментальное исследование скорости извлечения материала в процессе поворота электрического разряда проволоки для композита из металлической матрицы Al / SiCp, в: Proc. 37th Int. MATADOR Conf., Springer Science & Business Media, 2012: p. 79.
- [21]Thiagarajan Rajmohan Kayaroganam Palanikumar, Применение центрального композитного дизайна в оптимизации параметров обработки в буровых гибридных композитах металлической матрицы, Измерение 46, 2013, стр. 1470-1481.
- [22]С.А. Кришнан , Г.Л. СэмюэльМногоцелевая оптимизация скорости удаления материала и шероховатости поверхности при повороте электрического разряда проволоки
Int. J. Adv. Произв. Technol. , 1-12 (2013)
- [23]Г. Д. Реванкар , Р. Шетти , С. С. Рао , В. Н. ГайтондеАнализ шероховатости поверхности и твердости при обработке шаром титанового сплава
Измерение , 58 (2014) , стр. 256 - 268
[Статья](#)[Загрузить PDF](#)[Просмотреть запись в Scopus](#)
- [24]Ф. Jafarian , X. Amirabadi , Дж Садриизмерения и оптимизация остаточного напряжения растяжения в процессе поворота Inconel718 суперсплава на экспериментальном
Измерение , 63 (2015) , стр. 1 - 10
[Статья](#)[Загрузить PDF](#)[Просмотреть запись в Scopus](#)
- [25]F. Boud , LF Loo , PK KinnellВлияние простой гидроабразивной обработки на целостность поверхности алюминия 7475
Процедура CIRP , 13 (2014) , стр. 382 - 386
[Статья](#)[Загрузить PDF](#)[Просмотреть запись в Scopus](#)
- [26]С. Hloch , Дж Хлавачек , К. Василько , Дж Cárach , И. Самарджич , Д. Козак , И. Hlavatý , Джей Ščuška , Дж Клич , Д. Klichováгидроабразивный (AWJ) титан тангенциальная оценка поворота
Metalurgija , 53 (2014) , стр. 537 - 540