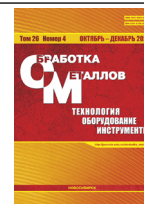




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Сравнительная оценка накатывания роликом сплава Al6061-T6 в условиях сухого трения и в условиях смазки минимальным количеством наножидкости

Авинаш Соматкар^{1, 2, a}, Рашими Диведди^{2, b}, Сатиш Чинчаникар^{3, c, *}

¹ Институт информационных технологий Вишвакармы, Кондва (Бадрек), Махараштра, Пуне – 411048, Индия

² Университет технологий и медицинских наук Шри Сатъя Сан, Сехор, Мадхья-Прадеш, 466001, Индия

³ Технологический институт Вишвакармы, Махараштра, Пуне – 411037, Индия

^a  <https://orcid.org/0000-0002-2885-2104>,  avinash.somatkar@viit.ac.in; ^b  <https://orcid.org/0000-0002-9755-5330>,  rashmidiveddi29@gmail.com;

^c  <https://orcid.org/0000-0002-4175-3098>,  satish.chinchanikar@viit.ac.in

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.787

История статьи:

Поступила: 30 сентября 2024

Рецензирование: 10 октября 2024

Принята к печати: 14 октября 2024

Доступно онлайн: 15 декабря 2024

Ключевые слова:

Накатывание роликами

Сплав Al6061-T6

Наножидкость

Минимальное количество смазки (MQL)

Оптимизация

АННОТАЦИЯ

Введение. Накатывание роликом является одним из самых популярных методов улучшения качества поверхности заготовки, повышения ее износостойкости, микротвердости и коррозионной стойкости. В процессе обработки заготовка сжимается и разглаживается под давлением закаленного ролика. **Цель работы.** Результаты исследований показывают, что внедрение минимального количества смазки (MQL) во время накатывания роликом дает возможность повысить эффективность процесса за счет снижения трения и улучшения смазывания. Исследования показали, что использование наножидкостей в условиях MQL улучшает производительность обработки. Однако накатыванию роликом сплава Al6061-T6 в условиях смазки минимальным количеством наножидкости (NFMQL) уделялось очень мало внимания. **Методы исследования.** В свете этого в данном исследовании сравнили эффективность накатки роликами сплава Al6061-T6 в условиях сухого трения и в условиях смазки минимальным количеством наножидкости. Микротвердость, отклонение от круглости и шероховатость поверхности оценены, смоделированы и оптимизированы в исследовании с учетом скорости вращения заготовки, подачи и количества проходов. На основе экспериментальных результатов созданы математические модели для прогнозирования шероховатости поверхности, микротвердости и изменения отклонения от круглости. **Результаты и обсуждение.** Для разработанных моделей шероховатости поверхности, микротвердости и отклонения от круглости наблюдается значение R-квадрата выше 0,9, что позволяет уверенно использовать эти модели для прогнозирования исследуемых откликов в условиях сухого трения и в условиях NFMQL в пределах области параметров, выбранных в настоящей работе. Согласно этому исследованию обработка, проведенная за четыре прохода при скорости вращения заготовки 357 об/мин и подаче инструмента 0,17 мм/об, позволяет получить минимальное отклонение от круглости (3,514 мкм), лучшую микротвердость (130,19 HV) и наименьшую шероховатость поверхности (0,64 мкм). Кроме того, исследование показывает, что увеличение количества проходов (более четырех) не приводит к значительному улучшению шероховатости поверхности или микротвердости. Однако это приводит к небольшому увеличению отклонения от круглости. Поэтому рекомендуется использовать максимум четыре прохода во время накатывания роликом образцов из алюминиевого сплава Al6061-T6 в условиях сухого трения для достижения оптимальных результатов. Полученные результаты означают, что накатывание роликом может эффективно повысить общее качество поверхности и твердость заготовки. Кроме того, накатка роликами рассматривается как доступный метод повышения функциональности и прочности обработанных деталей за счет снижения вероятности появления поверхностных дефектов, таких как царапины и трещины. Обнаружено, что при увеличении скорости вращения заготовки шероховатость поверхности уменьшается. Тем не менее замечено, что она увеличивается как в условиях сухого трения, так и в условиях NFMQL, когда скорость вращения заготовки возрастает до 360...380 об/мин. Более того, обнаружено, что она уменьшается с увеличением подачи и количества проходов. Однако после трех или четырех проходов при скорости подачи 0,2...0,25 мм/об наблюдается заметное увеличение шероховатости поверхности. Отмечено, что с увеличением подачи микротвердость и отклонение от круглости растут. Кроме того, по мере увеличения количества проходов наблюдается снижение отклонения от круглости и повышение микротвердости. Количество проходов в условиях сухого трения и подача при накатывании в условиях NFMQL оказывают существенное влияние на шероховатость поверхности. Скорость вращения заготовки, по-видимому, оказывает наибольшее влияние на микротвердость, за ней следуют подача и количество проходов. С другой стороны, кажется, что эффект увеличения микротвердости в условиях NFMQL-накатки проявляется сильнее. В условиях сухого трения скорость вращения заготовки оказывает существенное влияние на отклонение от круглости, а при накатывании в условиях NFMQL влияние оказывает подача.

Для цитирования: Соматкар А., Диведди Р., Чинчаникар С. Сравнительная оценка накатывания роликом сплава Al6061-T6 в условиях сухого трения и в условиях смазки минимальным количеством наножидкости // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 57–74. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-57-74.

Введение

Постоянный поиск новых методов обработки, позволяющих получить высокое качество поверхности и повысить ее механические свойства, в настоящее время вызывает большой

*Адрес для переписки

Чинчаникар Сатиш, д.т.н., профессор

Технологический институт Вишвакармы,

Пуне – 411037, Махараштра, Индия

Тел.: +91-2026950401, e-mail: satish.chinchanikar@viit.ac.in

интерес. Одним из таких методов является накатывание роликом. Он позволяет повысить качество обработанной поверхности и обеспечить точность размеров деталей из различных материалов. В процессе обработки используется жесткий ролик, который сглаживает неровности и позволяет получить глянцевую поверхность. Накатывание роликом также может повысить твердость материала на микроуровне [1]. Во многих отраслях промышленности используется алюминиевый сплав 6061-T6 (Al6061-T6) ввиду его прочности, легкости, технологичности и коррозионной стойкости. Однако с использованием традиционных методов получить высокие качество поверхности и механические свойства деталей из Al6061-T6 достаточно сложно. Накатывание роликом показало себя многообещающим в решении этих проблем. Оно может сгладить неровности на поверхности и повысить точность размеров [2].

Обработка с минимальным количеством смазки (MQL) предполагает введение небольшого количества смазывающего вещества непосредственно в зону резания. Этот метод снижает трение, продлевает срок службы инструмента и обеспечивает более гладкую поверхность. Такой метод обработки реализуется без экологических и финансовых проблем, которые возникают при использовании большого количества смазки. Недавние исследования показали хорошие результаты при сочетании MQL с различными процессами обработки, включая точение и фрезерование [3–6]. Куркуте и Чаван (Kurkute and Chavan) [7] оптимизировали шероховатость поверхности и микротвердость при накатке роликом сплава Al63400. В их исследовании подача рассматривалась как значимый параметр, влияющий на шероховатость поверхности. Пател и Брамбхатт (Patel and Brahmhatt) [8] обнаружили, что скорость вращения шпинделя и глубина полировки являются наиболее важными параметрами для повышения микротвердости на 28 % по сравнению с предварительно обработанными поверхностями.

Группа исследователей выполнила накатку роликом, варьируя такие параметры процесса, как подача, глубина резания, скорость вращения заготовки и количество проходов. В большинстве исследований разрабатывали эксперименты с использованием метода цен-

трального композиционного плана поверхности отклика. В части исследований скорость вращения заготовки рассматривалась как доминирующий параметр, влияющий на шероховатость поверхности, а в некоторых исследованиях было обнаружено, что подача существенно влияет на шероховатость поверхности. В ряде исследований сообщалось, что глубина резания существенно влияет на шероховатость поверхности, а скорость вращения заготовки и количество проходов существенно влияют на микротвердость. В некоторых исследованиях сообщалось о влиянии взаимодействия силы накатывания и количества проходов на шероховатость поверхности. Скорость вращения заготовки, подача и количество проходов существенно влияют на шероховатость поверхности и микротвердость. Однако можно заметить, что основные технологические параметры, влияющие на характеристики процесса, зависят от технологических параметров, материала заготовки и условий охлаждения.

Прасад и Джон (Prasad and John) [9] исследовали процесс накатки роликом на композиционном материале Mg-SiC. В их исследовании проводились эксперименты с изменением скорости вращения заготовки, подачи, силы и количества проходов. Авторы наблюдали уменьшение шероховатости поверхности при скорости 171 об/мин, скорости подачи 0,18 мм/об, силе 21 Н и трех проходах. Группа исследователей наблюдала изменения в поверхностных и металлургических текстурах из-за развития сильных контактных напряжений и увеличения пластической деформации поверхностного слоя компонента во время накатки роликами [10]. Исследования показали повышение качества поверхности при более низкой скорости и большей глубине внедрения [11].

Окада и др. (Okada et al.) [12] проанализировали характеристики накатки роликами при минимальном количестве смазки. В их исследовании наблюдалось увеличение твердости заготовки на 126...323 HV. Группа ученых выполнила накатку роликами с использованием различных методов охлаждения, таких как низкотемпературная (криогенная) накатка и с использованием керосина в качестве охлаждающей жидкости. Ученые наблюдали повышение твердости и чистоты поверхности при накатке в условиях MQL



и при использовании керосина в качестве смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) [13–15]. Группа исследователей оценивала целостность поверхности, варьируя такие параметры, как скорость, подача, количество проходов и условия охлаждения, а именно охлаждение поливом, MQL, низкотемпературное (криогенное) охлаждение и гибридное охлаждение. Результаты показали, что применение низкотемпературного (криогенного) охлаждения позволило повысить прочность материала, а использование гибридной охлаждающей жидкости позволило снизить шероховатость поверхности. Было отмечено, что микротвердость в незначительной степени зависит от типа условий охлаждения.

Из изученной литературы следует, что процесс накатки роликом эффективно повышает общее качество поверхности и твердость заготовки. Кроме того, накатка роликом рассматривается как доступный метод повышения функциональности и надежности обработанных деталей за счет снижения вероятности появления дефектов поверхности, таких как царапины и трещины. Исследования показали, что использование MQL при накатке роликом дает возможность сделать процесс еще лучше за счет улучшения смазки и снижения трения. За последнее десятилетие исследования показали более высокую производительность обработки при использовании наножидкостей в условиях MQL [16–19]. Однако попыток обработать сплав Al6061-T6 накаткой роликом с использованием наножидкости в условиях процесса формообразования с минимальным количеством смазки (NFMQL) было предпринято очень мало.

С этой точки зрения в настоящем исследовании проведена сравнительная оценка накатки роликом сплава Al6061-T6 без СОЖ и с использованием в качестве СОЖ наножидкости в условиях MQL. В работе произведена оценка, моделирование и оптимизация микротвердости, твердости, округлости и шероховатости поверхности с учетом таких факторов, как скорость вращения заготовки, подача и количество проходов. Математические модели для прогнозирования шероховатости поверхности, микротвердости и отклонения от округлости были разработаны на основе экспериментальных результатов. Химический состав материала, условия процесса формообразования и детали инструмента для

накатки роликами представлены в следующем разделе. В третьем разделе обсуждается разработка экспериментальных математических моделей для прогнозирования шероховатости поверхности, микротвердости и округлости накатанной заготовки при обоих условиях охлаждения. В четвертом разделе проведена сравнительная оценка влияния параметров накатки роликом на характеристики, а именно шероховатость поверхности, микротвердость и округлость обработанной роликом заготовки при реализации обоих условий охлаждения. Далее представлены оптимизированные параметры процесса для достижения минимальной шероховатости поверхности и лучшей микротвердости и округлости поверхности при реализации обоих условий охлаждения. Наконец, представлены важные результаты настоящего исследования и возможности будущих исследований в этой области.

Материалы и методы исследования

В настоящем исследовании использовали алюминиевый сплав 6061 (Al6061-T6), который находит широкое применение в приложениях общего назначения. Благодаря своему отношению предела прочности к весу, стойкости к коррозии и хорошей свариваемости этот сплав пользуется популярностью в производственных процессах и подходит для изготовления из него различных структурных компонентов. Это дисперсионно-твердеющий алюминиевый сплав, два наиболее важных компонента которого – кремний и магний. Свариваемость является основным преимуществом алюминиевого сплава 6061. Он используется в аэрокосмической промышленности благодаря прочности и легкости, а благодаря своему химическому составу может также использоваться в автомобиле- и судостроении. Выбранный образец имеет диаметр 30 мм и длину 50 мм. В табл. 1 показаны характеристики и химический состав алюминиевого сплава 6061.

В этом исследовании применялся однорольковый накатной инструмент с твердосплавным роликом. Твердосплавный ролик накатной инструмент универсален и может использоваться на различных станках для разных целей. Возможность восстановления и продления срока службы инструмента делает его использование экономически эффективным решением для до-

Таблица 1

Table 1

Химический состав сплава Al6061-T6
Chemical composition of Al6061-T6 alloy

Элемент	Al	Cu	Cr	Mg	Mn	Si	Zn	Fe	Ti
Процентное содержание	95,8	0,15	0,2	1,1	0,15	0,75	0,25	0,19	0,15

стижения высокого качества поверхности. Для поддержания надлежащего давления в течение всего процесса накатки твердосплавный ролик подпружинен в обоих осевых направлениях. Путем переточки или притирки изношенного твердосплавного ролика его можно восстановить и продлить срок его службы. Инструмент с твердосплавным роликом может использоваться на токарных станках с ЧПУ, revolverных станках или традиционных токарных станках и подходит для всех внешних поверхностей валов, конических валов, радиусов, заплечиков и др. Накатка обработанной поверхности возможна до 0,1...0,2 мкм. На рис. 1 изображен накатник, который использовался в настоящем исследовании.



Рис. 1. Роликовый отделочный накатник, используемый в настоящем исследовании

Fig. 1. Roller burnishing tool used in the present study

Постоянная глубина накатки, равная 0,5 мм, поддерживалась при изменении подачи, скорости вращения заготовки и количества проходов в экспериментах без СОЖ и с использованием в качестве СОЖ наножидкости в условиях MQL. Наночастицы оксида алюминия (Al_2O_3) были объединены с базовой жидкостью на основе рас-

считительного подсолнечного масла для создания наножидкости. Шероховатость поверхности, микротвердость и отклонение от круглости (три основные характеристики, влияющие на показатели устойчивости) были изучены с использованием метода проектирования эксперимента (DOE). Все отклики были проанализированы, и эмпирические модели разработаны с использованием центрального композитного дизайна (CCD). Эксперименты были спланированы с использованием тестовой матрицы ротатбельного центрального композиционного планирования (CCRD) со значением альфа, равным 1,6817. Для изменения каждого числового параметра использовались пять уровней: центральная точка, плюс и минус 1 (факториальные точки) и плюс и минус альфа (осевые точки). В этой работе было проведено двадцать испытаний накаткой роликом в условиях NFMQL и отсутствия СОЖ с различными параметрами процесса для построения моделей шероховатости поверхности, микротвердости и отклонения от круглости. В табл. 2 перечислены кодированные уровни вместе с фактическими значениями параметров накатки, которые им соответствуют.

Для определения средних значений шероховатости поверхности использовали оборудование Taylor Hobson Talysurf, Surtronic Duo и автономное устройство измерения шероховатости поверхности. Для получения статистически значимого значения шероховатость поверхности измеряли в трех равномерно расположенных точках по периметру заготовки. Оценка качества поверхности была выполнена точно и последовательно в соответствии с этим подходом. Для проверки круглости использовали КИМ мостового типа (Zeiss Contura, диапазон измерения по осям 1200×800×800 мм). Геометрические отклонения были определены путем измерения круглости в двенадцати частях калиброванной области с помощью микрометрического инди-

Таблица 2

Table 2

Кодированные уровни и соответствующие им фактические параметры накатывания
Coded levels and corresponding actual cutting parameters

Параметры	Уровни для значения альфа, равного				
	-1,6817	-1	0	+1	+1,6817
Скорость вращения заготовки V , об/мин	100	200	300	400	500
Скорость подачи f , мм/об	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
Количество проходов N	0,5	1	1,5	2	2,5

катора, имеющего диапазон измерения 12,5 мм, цену деления шкалы 0,001 мм и максимально допустимую погрешность (MPE) 4 мкм. Кроме того, микротвердость оценивали с помощью микротвердомера Виккерса. Угол при вершине алмазного индентора составлял 136°, испытание проводили при нагрузке в 100 г и 20-секундном периоде выдержки. Использование данных о шероховатости поверхности, отклонении от круглости и результатов микродюрметрических испытаний позволило провести тщательное исследование свойств заготовки.

Результаты и их обсуждение

В этом разделе рассматривается влияние параметров процесса накатки роликами на характеристики процесса в условиях NFMQL и отсутствия СОЖ на основе созданных уравнений регрессии. Кривые, показывающие различные отклики, построены путем изменения одного из входных параметров при сохранении других параметров постоянными, чтобы понять физику процесса и эффекты взаимодействия параметров накатки на различные характеристики. Это также позволяет получить информацию о влиянии параметров накатки на различные технологические характеристики. Наконец, оптимизация технологических характеристик процесса при накатке роликом сплава Al6061-T6 рассматривается с использованием метода функции желательности.

Скорость вращения заготовки, подача и количество проходов (входные параметры) варьировались в ходе экспериментов. В табл. 3 представлена экспериментальная матрица и результаты наибольшего отклонения от круглости, микротвердости и шероховатости поверхности при

накатке роликом сплава Al6061-T6 в условиях NFMQL и отсутствия СОЖ. Экспериментальные результаты накатки роликом сплава Al6061-T6 в условиях отсутствия СОЖ приведены в [20].

Методология поверхности отклика (RSM) была основной для анализа экспериментальных результатов. Нахождение области интереса, где отклик(и) достигает своего оптимального или близкого к нему значения, было еще одной целью использования RSM в дополнение к исследованию отклика(ов) во всем факторном пространстве. Чтобы понять физику процесса, был проведен анализ экспериментальных данных с целью создания уравнений регрессии для шероховатости поверхности (Ra), микротвердости (HV) и отклонения от круглости (Re). С помощью программы Stat-Ease Design Expert® (версия 7.0) был использован регрессивный метод для определения значений коэффициентов в уравнении.

Уравнения, разработанные для определения фактических значений коэффициента шероховатости поверхности, микротвердости и отклонения от круглости в отсутствие СОЖ, приведены в [20], а уравнения для определения показателей при использовании наножидкости в условиях MQL приведены ниже:

$$Ra = 1,4209 - 0,00064V - 4,0943f - 0,2224N - 0,00275Vf - 0,00019VN + 0,025fN + 3,11 \cdot 10^{-6}V^2 + 13,4545f^2 + 20,042N^2; \quad (1)$$

$$HV = 85,3181 + 0,213V + 40,1136f - 6,3238N - 0,325Vf + 0,00625VN + 47,5fN - 0,0002V^2 - 90,91f^2 - 0,3522N^2; \quad (2)$$

Таблица 3

Table 3

Матрица эксперимента накатывания роликом

Roller burnishing experimental matrix

Скорость вращения заготовки V , об/мин	Скорость подачи f , мм/об	Количество проходов N	Шероховатость поверхности Ra , мкм		Микротвердость HV		Отклонение от круглости Re , мкм	
			Сухое трение	NFMQL	Сухое трение	NFMQL	Сухое трение	NFMQL
300	0,2	3	0,81	0,62	117	128	7,7	4,8
200	0,15	2	0,82	0,68	114	120	9,6	5,6
200	0,15	4	0,89	0,69	116	118	8,6	4,8
200	0,25	2	0,92	0,77	116	122	5,4	8,8
200	0,25	4	0,9	0,78	125	131	8,7	7,7
400	0,15	2	0,94	0,78	118	129	10,1	3,4
400	0,15	4	0,84	0,71	111	131	1,6	3,2
400	0,25	2	0,97	0,81	110	126	8,4	9,2
400	0,25	4	0,79	0,75	113	136	2,9	7,4
300	0,2	3	0,81	0,61	117	128	8,4	5,5
300	0,2	3	0,81	0,61	117	128	8,6	5,7
100	0,2	3	0,92	0,72	112	108	13,2	9
500	0,2	3	0,93	0,75	104	131	4,2	6,1
300	0,1	3	0,94	0,70	123	121	1,5	2,8
300	0,3	3	0,96	0,79	124	132	2	9,2
300	0,2	1	0,95	0,83	123	119	8,7	7,7
300	0,2	5	0,86	0,73	125	133	4	3,6
300	0,2	3	0,83	0,65	117	125	6,9	5,2
300	0,2	3	0,82	0,61	113	128	8,3	5,4
300	0,2	3	0,81	0,62	118	131	8,7	5,9

$$\begin{aligned}
 Re = & 13,142 - 0,058V - 3,78f - \\
 & - 0,18N + 0,0975Vf - \\
 & - 1,3 \cdot 10^{-4}VN - 4,75fN + 5,43 \cdot 10^{-5}V^2 + \\
 & + 62,2f^2 + 0,0682N^2.
 \end{aligned} \quad (3)$$

Используя метод дисперсионного анализа (ANOVA), была проверена достаточность полученных уравнений. Доля вариации точек данных измеряется коэффициентом множественных определений или R -квадратом. Коэффициент корреляции (R -квадрат), который находится между -1 и $+1$, всегда идеален. Если R действительно близок к $+1$, то уравнение важно.

Измерение того, какую часть дисперсии вокруг среднего значения объясняет модель, называется скорректированным R -квадратом. Мерой предсказательной точности модели для значения отклика является прогнозируемый R -квадрат. Считается «приемлемым соответствием», когда скорректированные и ожидаемые значения R -квадрата находятся в пределах около 0,20 друг от друга. В противном случае может быть проблема с моделью или данными. Отношение сигнал/шум или диапазон в ожидаемом отклике относительно соответствующей ошибки – это то, что называется достаточной точностью. Четыре или более – идеальное значение.

С результатами ANOVA для определения шероховатости поверхности, микротвердости и отклонения от круглости при накатке роликом в условиях отсутствия СОЖ можно ознакомиться в [20], а результаты ANOVA в условиях NFMQL приведены в табл. 4. Результаты ANOVA для исследованных откликов в условиях отсутствия СОЖ также приведены в табл. 4 для сравнительной оценки. Результаты ANOVA для определения шероховатости поверхности в условиях отсутствия СОЖ и в условиях NFMQL показывают, что модельные F -значения равны 46,91 и 19,51 соответственно. Следовательно, модели являются значимыми. Значения «Prob > F » менее 0,05 указывают на то, что условия модели являются значимыми. Значимыми параметрами модели, наблюдаемыми для шероховатости поверхности в условиях отсутствия СОЖ, являются f , N , $V \times f$, $V \times N$, $f \times N$, V^2 , f^2 , N^2 , а для накатки в условиях NFMQL значимыми параметрами модели являются V , f , N , $V \times f$, V^2 , f^2 , N^2 .

Результаты ANOVA для микротвердости показывают, что модельные F -значения, равные 11,99 и 16,71, при накатке роликом в условиях отсутствия СОЖ и в условиях NFMQL означают, что модели значимы. Существует всего 0,03%-я вероятность того, что такое большое «модельное F -значение» может возникнуть из-за шума. В этом случае V , $V \times f$, $V \times N$, $f \times N$, V^2 , f^2 , N^2 при накатке роликом в условиях отсутствия СОЖ и V , f , N , $V \times f$, $f \times N$, V^2 в условиях NFMQL явля-

ются значимыми параметрами модели. Результаты ANOVA для округлости показывают, что модельные F -значения, равные 17,62 и 27,35, при накатке роликом в условиях отсутствия СОЖ и в условиях NFMQL означают, что модели значимы. В этом случае V , N , $V \times N$, $f \times N$, f^2 при накатке роликом в условиях отсутствия СОЖ и V , f , N , $V \times f$, V^2 в условиях NFMQL являются значимыми параметрами модели.

Каждая модель, созданная для накатки роликом в условиях отсутствия СОЖ и в условиях NFMQL, имеет значение R -квадрат выше 0,9, что указывает на долю вариации в точках данных. Таким образом, во время накатки роликом сплава Al6061-T6 микротвердость, шероховатость поверхности и отклонение от круглости можно точно предсказать с помощью установленных эмпирических уравнений.

Для улучшения понимания созданы двумерные графики влияния подачи, скорости и количества проходов на шероховатость поверхности, твердости и отклонения от круглости с использованием полученных уравнений 1–3. Для облегчения сравнения и лучшего понимания также построены кривые для исследуемых реакций в условиях отсутствия СОЖ с использованием моделей, полученных в [20]. Построение кривых для шероховатости поверхности, микротвердости и отклонения от круглости включает изменение одного входного параметра при сохранении постоянного значения для двух других.

Таблица 4

Table 4

Дисперсионный анализ (ANOVA) для исследованных откликов в условиях NFMQL и отсутствия СОЖ [20]

ANOVA for investigated responses under dry [20] and NFMQL cutting conditions

Факторы	Шероховатость поверхности R_a , мкм		Микротвердость HV		Отклонение от круглости R_e , мкм	
	Сухое трение	NFMQL	Сухое трение	NFMQL	Сухое трение	NFMQL
R -квадрат	0,9769	0,9461	0,9152	0,9377	0,9407	0,9609
Скорректированный R -квадрат	0,956	0,89765	0,8389	0,8816	0,8873	0,9258
Прогнозируемый R -квадрат	0,8472	0,848529	0,855	0,8389	0,8933	0,7421
Адекватная точность	19,328	12,74978	15,464	16,5655	16,002	18,2847
F -значение модели	46,91	19,51	11,99	16,71	17,62	27,35

На рис. 2, а показана зависимость шероховатости поверхности от скорости вращения заготовки при скорости подачи 0,2 мм/об и количестве проходов, равном трем. На рис. 2, б показана зависимость шероховатости поверхности от скорости подачи при скорости вращения заготовки 300 об/мин и количестве проходов, равном трем. На рис. 2, в показана зависимость шероховатости поверхности от количества проходов при скорости вращения заготовки 300 об/мин и скорости подачи, равной 0,2 мм/об. Сравнивая накатку роликом в условиях NFMQL и в условиях отсутствия СОЖ, можно отметить в первом случае меньшую шероховатость поверхности. Можно также заметить, что по мере возрастания скорости вращения заготовки до 360–380 об/мин шероховатость поверхности уменьшается перед увеличением. Кроме того, она уменьшается с увеличением скорости подачи и количества проходов. Однако при скорости подачи выше 0,2...0,25 мм/об и количества проходов более 3–4 шероховатость поверхности увеличивается.

На рис. 2, б видно оптимумы для откликов при изменении скорости подачи. Минимальные шероховатость поверхности и отклонение от круглости можно получить, используя скорость подачи в диапазоне 0,18...0,22 мм/об, скорость вращения заготовки в диапазоне 250...350 об/мин и три прохода. На рис. 3, а и рис. 4, а отражены изменения микротвердости и отклонения от круглости соответственно в зависимости от скорости вращения заготовки, полученные при постоянной скорости подачи 0,2 мм/об и трех проходах. Можно увидеть, что микротвердость увеличивается с повышением скорости вращения заготовки. Однако этот эффект был более выражен для накатки роликом в условиях NFMQL. Более высокие значения микротвердости можно увидеть при накатке роликом в условиях NFMQL. Так, микротвердость уменьшается при достижении скорости вращения заготовки 280...300 об/мин. С другой стороны, видно, что отклонение от круглости уменьшается с увеличением скорости вращения заготовки (рис. 4, а). Однако можно за-

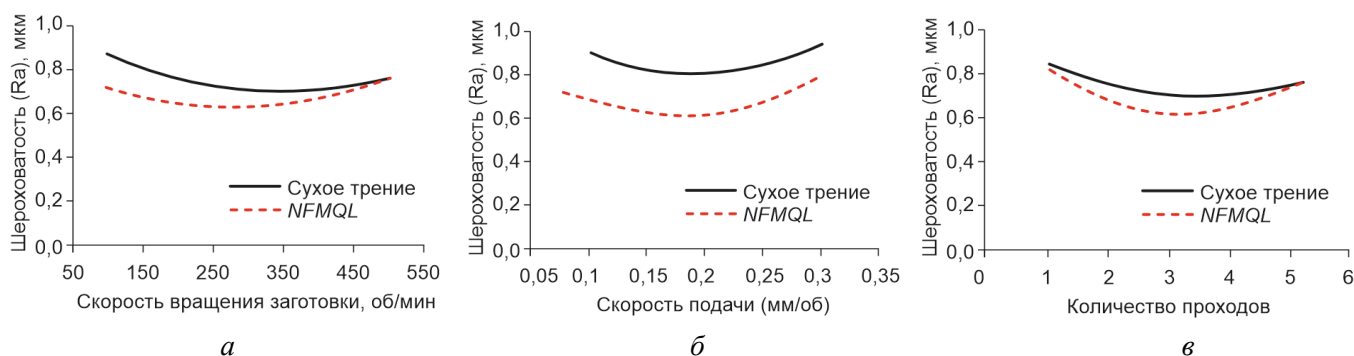


Рис. 2. Шероховатость поверхности, изменяющаяся в зависимости от скорости вращения заготовки (а), скорости подачи (б) и количества проходов (в)

Fig. 2. Surface roughness varying with cutting speed (a), feed (б), and number of passes (в)

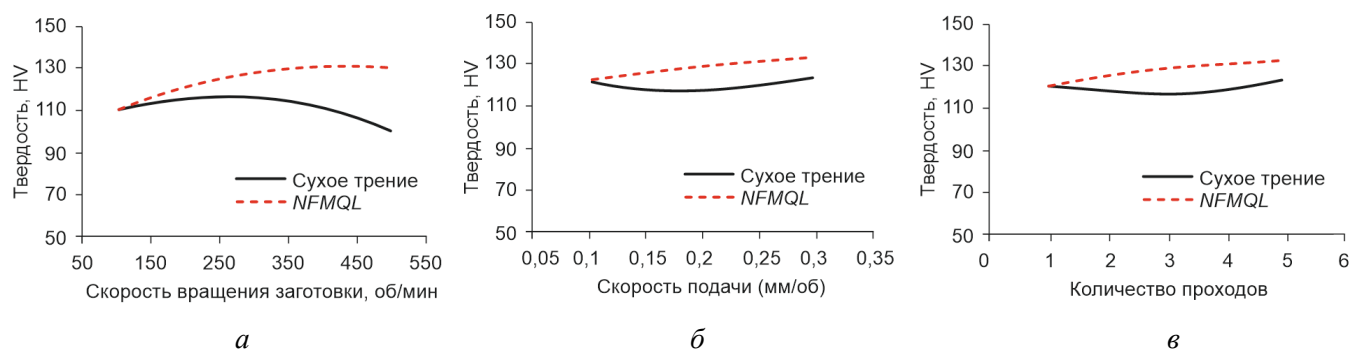


Рис. 3. Твердость, изменяющаяся в зависимости от скорости вращения заготовки (а), скорости подачи (б) и количества проходов (в)

Fig. 3. Microhardness varying with cutting speed (a), feed (б), and number of passes (в)

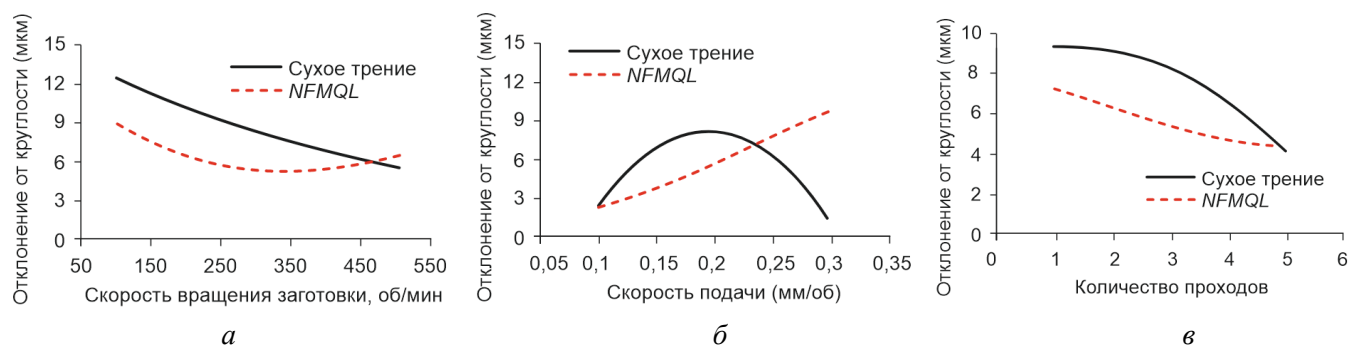


Рис. 4. Отклонение от круглости, изменяющееся в зависимости от скорости вращения заготовки (*a*), скорости подачи (*б*) и количества проходов (*в*)

Fig. 4. Roundness error varying with cutting speed (*a*), feed (*б*), and number of passes (*в*)

метить, что она увеличивается при достижении скорости вращения заготовки 300...350 м/мин. Более низкие значения отклонения от круглости отмечены при накатке роликом в условиях NFMQL.

На рис. 3, *б* и рис. 4, *б* отражены изменения микротвердости и отклонения от круглости соответственно в зависимости от скорости подачи, полученные при постоянной скорости вращения заготовки 300 об/мин и трех проходах. На рис. 3, *в* и рис. 4, *в* показаны изменения микротвердости и отклонения от круглости соответственно в зависимости от количества проходов, полученные при постоянной скорости вращения заготовки 300 об/мин и скорости подачи 0,2 мм/об.

Видно, что максимальная микротвердость, меньшие шероховатость поверхности и отклонение от круглости могут быть получены при накатке роликом в условиях NFMQL по сравнению с накаткой роликом в условиях отсутствия СОЖ. Микротвердость и отклонение от круглости могут увеличиваться с повышением скорости подачи. Увеличение микротвердости и уменьшение отклонения от круглости происходит с увеличением количества проходов. Видно, что повышение скорости подачи приводит к противоречивым откликам для шероховатости поверхности и микротвердости. Компромисс между отклонением от круглости, микротвердостью и меньшей шероховатостью поверхности может быть получен с использованием значения скорости подачи в диапазоне 0,18...0,22 мм/об. Шероховатость поверхности может уменьшаться с увеличением количества проходов. Однако существенного преимущества в снижении шероховатости поверхности при реализации более

чем четырех проходов не наблюдается. Отклонение от круглости может быть минимизировано с использованием большего количества проходов. Аналогично максимальная микротвердость может быть получена с использованием большего количества проходов.

В табл. 5–7 показаны результаты ANOVA для *F*-значений шероховатости поверхности, микротвердости и отклонения от круглости при накатке роликом в условиях отсутствия СОЖ и в условиях NFMQL соответственно. Как уже было отмечено в [20], с помощью ANOVA исследованы отклики для накатки роликом в условиях отсутствия СОЖ. *F*-значение выделено, чтобы отметить факторы, которые оказали существенное влияние на отклики. Табл. 5–7 также содержат процентные вклады различных элементов, которые рассчитаны путем деления *F*-значения каждого элемента на *F*-значение всего элемента.

Согласно табл. 5, в условиях отсутствия СОЖ на шероховатость поверхности в первую очередь влияют более высокий порядок скорости подачи (вклад около 30,76 %), более высокий порядок скорости вращения заготовки и эффект взаимодействия скорости вращения заготовки и количества проходов (вклад около 20 % и 15,88 % соответственно). Скорость вращения заготовки и скорость подачи, с другой стороны, оказывают минимальное влияние. Тем не менее можно считать, что количество проходов имеет решающее значение для снижения шероховатости поверхности. И наоборот, при накатке роликом в условиях NFMQL на шероховатость поверхности больше всего влияет более высокий порядок количества проходов (вклад около 36,98 %), за которым следует более высокий порядок скорости

Дисперсионный анализ (ANOVA) для определения шероховатости поверхности (R_a): F -значения и процентный вклад различных параметров

ANOVA for surface roughness (R_a): F -values and % contribution of different parameters

Элементы	Сухое трение		NFMQL	
	F -значение	Процентный вклад	F -значение	Процентный вклад
Скорость резания V , об/мин	0,3382	0,07	4,2267	1,85
Подача f , мм/об	6,3512	1,23	<u>21,6487</u>	9,46
Количество проходов N	<u>63,1738</u>	12,25	11,2517	4,92
Взаимодействие V и f	<u>12,7024</u>	2,46	2,8334	1,24
Взаимодействие V и N	<u>81,8517</u>	15,88	5,2688	2,30
Взаимодействие f и N	<u>21,7218</u>	4,21	0,0234	0,01
V^2	<u>103,2749</u>	20,03	<u>45,6632</u>	19,96
f^2	<u>158,5728</u>	30,76	<u>53,2904</u>	23,29
N^2	<u>67,5406</u>	13,10	<u>84,6219</u>	36,98
Итоговое F -значение	515,5274	100,00	228,8283	100,00

Важные элементы выделены подчеркиванием, а вклады – полужирным шрифтом.

подачи и скорость вращения заготовки (вклад около 23,29 и 19,96 % соответственно).

Табл. 6 показывает результаты ANOVA для F -значений микротвердости при накатке роликом в условиях отсутствия СОЖ и в условиях NFMQL. Очевидно, что в условиях сухой обработки более высокий порядок скорости резания V^2 (примерно 31,02 % вклада), скорость резания V (примерно 16,91 % вклада) и более высокий порядок подачи f^2 и проходов N^2 (примерно 12,68 и 14,87 % вклада соответственно) оказывают наибольшее влияние на микротвердость, при этом подача f и количество проходов N оказывают наименьшее влияние (порядка 0,68 и 1,67 % вклада соответственно). Напротив, в условиях применения NFMQL результаты экспериментов показывают, что количество проходов N (17,8 % вклада), подача f (12,25 % вклада), скорость резания первого порядка V (47,77 %) и второго порядка V^2 (12,67 %) оказывают наибольшее влияние на микротвердость.

В табл. 7 приведены результаты ANOVA для F -значений отклонения от круглости при накатке роликом в условиях отсутствия СОЖ и в

условиях NFMQL. В условиях отсутствия СОЖ отклонение от круглости в значительной степени зависит от более высокого порядка скорости подачи (вклад около 32,5 %), скорости вращения заготовки (вклад около 25,89 %), количества проходов (вклад около 15,47 %), а также эффекта взаимодействия скорости вращения заготовки и количества проходов (вклад около 18,46 %). С другой стороны, отклонение от круглости при накатке роликом в условиях NFMQL, как можно заметить, сильно зависит от скорости подачи (вклад около 67,36 %), количества проходов (вклад около 11,81 %) и более высокого порядка скорости вращения заготовки (вклад около 9,57 %).

Очевидно, что скорость подачи в условиях NFMQL и количество проходов в условиях отсутствия СОЖ оказывают значительное влияние на шероховатость поверхности. Скорость вращения заготовки, по-видимому, оказывает наибольшее влияние на микротвердость, а скорость подачи и количество проходов идут на втором и третьем месте. С другой стороны, этот эффект кажется более выраженным при накатке роликом в условиях NFMQL. В условиях отсутствия

Таблица 6

Table 6

**Дисперсионный анализ (ANOVA) для определения микротвердости: F -значения
и процентный вклад различных параметров**

ANOVA for microhardness: F -values and % contribution of different parameters

Элементы	Сухое трение		NFMQL	
	F -значение	Процентный вклад	F -значение	Процентный вклад
Скорость резания V , об/мин	<u>15,8251</u>	16,91	<u>72,1848</u>	47,77
Подача f , мм/об	0,6335	0,68	<u>18,5180</u>	12,25
Количество проходов N	1,5631	1,67	<u>26,8943</u>	17,80
Взаимодействие V и f	7,4668	7,98	4,1151	2,72
Взаимодействие V и N	5,8132	6,21	0,6087	0,40
Взаимодействие f и N	7,4668	7,98	8,7903	5,82
V^2	<u>29,0338</u>	31,02	<u>19,1484</u>	12,67
f^2	<u>11,8708</u>	12,68	0,2530	0,17
N^2	<u>13,9156</u>	14,87	0,6078	0,40
Итоговое F -значение	93,5887	100	151,1204	100,00

Важные элементы выделены подчеркиванием, а вклады – полужирным шрифтом.

Таблица 7

Table 7

**Дисперсионный анализ (ANOVA) для определения отклонения от круглости:
 F -значения и процентный вклад различных параметров**

ANOVA for roundness error: F -values and % contribution of different parameters

Элементы	Сухое трение		NFMQL	
	F -значение	Процентный вклад	F -значение	Процентный вклад
Скорость резания V , об/мин	<u>40,2758</u>	25,89	18,0635	7,28
Подача f , мм/об	0,6619	0,43	<u>167,1666</u>	67,36
Количество проходов N	<u>24,0589</u>	15,47	<u>29,3038</u>	11,81
Взаимодействие V и f	1,4796	0,95	6,0885	2,45
Взаимодействие V и N	<u>28,7154</u>	18,46	0,0040	0,00
Взаимодействие f и N	5,7595	3,70	1,4451	0,58
V^2	0,9816	0,63	<u>23,7563</u>	9,57
f^2	<u>50,5574</u>	32,50	1,9515	0,79
N^2	3,0571	1,97	0,3743	0,15
Итоговое F -значение	155,5472	100	248,1536	100,00

Важные элементы выделены подчеркиванием, а вклады – полужирным шрифтом.

СОЖ скорость вращения заготовки оказывает существенное влияние на отклонение от круглости; в условиях NFMQL скорость подачи оказывает значительное влияние. Из рис. 2–4 и табл. 5–7 очевидно, что параметры процесса противоречат полезным откликам. Кроме того, для получения желаемых результатов необходима многоцелевая оптимизация этих конкурирующих параметров.

В настоящей работе для оптимизации параметров процесса накатки роликом в условиях

NFMQL с целью достижения минимального отклонения от круглости, максимальной микротвердости и минимальной шероховатости поверхности используется метод функции желательности. При использовании этого метода оптимизация нескольких переменных отклика становится оптимизацией одной функции желательности, а каждая переменная отклика преобразуется в функцию желательности [20–23]. В табл. 8 перечислены диапазоны функции отклика и переменные процесса.

Таблица 8

Table 8

Ограничения для оптимизации параметров процесса при обработке в условиях NFMQL

Constraints for optimization of process parameters for NFMQL cutting conditions

Параметры	Заданный уровень	Минимальный предел	Максимальный предел
Скорость резания V , об/мин	В диапазоне	100	500
Подача f , мм/об	В диапазоне	0,1	0,2
Количество проходов N	В диапазоне	1	5
Шероховатость поверхности Ra , мкм	Минимизировать	0,61	0,83
Микротвердость HV	Минимизировать	108	136
Отклонение от круглости Re , мкм	Минимизировать	2,8	9,2

В табл. 8 представлены минимальные и максимальные значения предела шероховатости поверхности, микротвердости и отклонения от круглости на основе экспериментальных результатов. Для преобразования каждого отклика в соответствующую ему функцию желательности используется одностороннее преобразование [20–23]. В этом исследовании была проведена многоцелевая оптимизация накатки роликом с использованием модуля оптимизации программного обеспечения Design-Expert®. Желательность шероховатости поверхности, микротвердости и отклонения от круглости оценивалась для каждого уровня независимых факторов. Желательность минимальной шероховатости поверхности, максимальной микротвердости и минимального отклонения от круглости затем преобразовывались в одну функцию желательности. Оптимальные параметры процесса для наименьшей шероховатости поверхности, максимальной микротвердости и минимального

отклонения от круглости в условиях NFMQL представлены в табл. 9.

Настоящее исследование показывает, что идеальными параметрами для накатки роликами сплава Al6061-T6 являются скорость вращения заготовки 357 об/мин, скорость подачи 0,17 мм/об и четыре прохода. Эти результаты дают минимальную шероховатость поверхности 0,64 мкм, максимальную микротвердость 130,19 HV и минимальное отклонение от круглости 3,514 мкм. Однако было обнаружено, что идеальными параметрами для накатки роликами сплава Al6061-T6 в условиях отсутствия СОЖ являются скорость вращения заготовки 344 об/мин, скорость подачи 0,25 мм/об и четыре прохода. Это дает минимальную шероховатость поверхности 0,807 мкм, максимальную микротвердость 119,2 HV и минимальное отклонение от круглости 4,282 мкм.

Как можно видеть, накатка роликами в условиях NFMQL дает сниженные значения шероховатости поверхности, отклонения от круглости

Семейство оптимизированных параметров обработки в условиях NFMQL
A family of optimized process parameters for NFMQL cutting conditions

№	Скорость резания V , об/мин	Подача f , мм/об	Количество проходов N	Шероховатость поверхности Ra	Микротвердость HV	Отклонение от круглости Re	Необходимое значение
1	357,6	0,17	3,68	0,6435	130,1976	3,519	0,8417
2	357,64	0,16	3,68	0,6436	130,1916	3,515	0,8417
3	357,81	0,16	3,68	0,6436	130,1988	3,514	0,8417
4	357,68	0,17	3,68	0,6436	130,2047	3,518	0,8417
5	357,85	0,16	3,68	0,6436	130,1997	3,515	0,8417
6	357,67	0,16	3,68	0,6436	130,1962	3,515	0,8417

и максимальной микротвердости по сравнению с накаткой роликом в условиях отсутствия СОЖ. Самая низкая шероховатость поверхности, которую удалось обнаружить, составила 0,64 мкм. Однако проделанная работа подчеркивает необходимость дополнительных исследований накатки роликом сплавов Al6061-T6 с целью получения улучшенной геометрии готовой детали, которая приближается к шероховатости поверхности до 0,3–0,4 мкм с повышенной микротвердостью.

Выводы

В настоящей работе была предпринята попытка исследовать накатку роликом сплава Al6061-T6. В исследовании дана сравнительная оценка накатки роликом сплава Al6061-T6 в условиях отсутствия СОЖ и с использованием наножидкости в условиях минимального количества смазки (NFMQL). В исследовании оценены, смоделированы и оптимизированы микротвердость, округлость и шероховатость поверхности с учетом таких факторов, как скорость вращения детали, скорость подачи и количество проходов. Математические модели для прогнозирования шероховатости поверхности, микротвердости и отклонения от круглости были разработаны на основе экспериментальных результатов. Можно сделать следующие выводы.

- Для моделей шероховатости поверхности, микротвердости и отклонения от круглости по-

лучено значение R -квадрата выше 0,9; значит, разработанные модели могут быть использованы для прогнозирования исследуемых откликов и в условиях отсутствия СОЖ, и в условиях NFMQL.

- Накатка роликом в условиях NFMQL обеспечивает пониженные значения шероховатости поверхности (0,64 мкм), отклонения от круглости (3,514 мкм) и максимальной микротвердости (130,19 HV) по сравнению с накаткой в условиях отсутствия СОЖ. Однако накатка роликом в условиях отсутствия СОЖ дает сравнительно более высокую шероховатость поверхности (0,807 мкм), отклонения от круглости (4,282 мкм) и более низкую микротвердость (119,2 HV).

- Шероховатость поверхности уменьшается с повышением скорости вращения заготовки. Однако она увеличивается с ростом скорости вращения заготовки до 360...380 об/мин как в условиях отсутствия СОЖ, так и в условиях NFMQL. Кроме того, наблюдается уменьшение шероховатости при повышении скорости подачи и количества проходов. Однако после трех-четырёх проходов со скоростью подачи 0,2...0,25 мм/об замечено увеличение шероховатости поверхности.

- Микротвердость и отклонение от круглости увеличиваются с повышением скорости подачи. Увеличение микротвердости и уменьшение отклонения от круглости наблюдаются с увеличением количества проходов.

- Повышение скорости подачи рассматривается как приводящее к противоречивым откликам для шероховатости поверхности и микротвердости. Компромисс между отклонением от круглости, микротвердостью и более низкой шероховатостью поверхности получен с использованием значения скорости подачи в диапазоне 0,18...0,22 мм/об. Отмечено, что отклонение от круглости уменьшается с увеличением количества проходов, а максимальная микротвердость наблюдается с увеличением количества проходов.

- Шероховатость поверхности существенно зависит от скорости подачи при накатке роликом в условиях NFMQL и количества проходов в условиях отсутствия СОЖ. Микротвердость, по-видимому, в большей степени зависит от скорости вращения заготовки, а скорость подачи и количество проходов идут на втором и третьем месте. Однако похоже, что этот эффект более заметен при накатке роликом в условиях NFMQL. Отклонение от круглости существенно зависит от скорости вращения заготовки в условиях отсутствия СОЖ и скорости подачи при накатке роликом в условиях NFMQL.

- Скорость вращения заготовки, равная 357 об/мин, скорость подачи 0,17 мм/об и четыре прохода рекомендованы в качестве оптимальных параметров для накатки роликом сплава Al6061-T6 для получения минимальной шероховатости поверхности 0,64 мкм, максимальной микротвердости 130,19 HV и минимального отклонения от круглости 3,514 мкм.

Список литературы

1. Ball burnishing application for finishing sculptured surfaces in multi-axis machines / A. Rodríguez, L.N. López de Lacalle, A. Celaya, A. Fernández, A. Lamikiz // *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*. – 2011. – Vol. 4. – P. 220–237. – DOI: 10.1504/IJMMS.2011.041470.

2. Saffar S., Eslami H. Increasing the fatigue life and surface improvement of AL7075 alloy T6 by using ultrasonic ball burnishing process // *International Journal of Surface Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 16 (3). – P. 181–206. – DOI: 10.1504/IJSURFSE.2022.125438.

3. Somatkar A.A., Dwivedi R., Chinchani S. Enhancing surface integrity and quality through roller burnishing: a comprehensive review of parameters optimization, and applications // *Communications on*

Applied Nonlinear Analysis. – 2024. – Vol. 31 (1s). – P. 51–69. – DOI: 10.52783/cana.v31.563.

4. Artificial neural network-based optimization of operating parameters for minimum quantity lubrication-assisted burnishing process in terms of surface characteristics / T.-T. Nguyen, T.-A. Nguyen, Q.-H. Trinh, X.-B. Le, L.-H. Pham, X.-H. Le // *Neural Computing and Applications*. – 2022. – Vol. 34 (9). – P. 7005–7031. – DOI: 10.1007/s00521-021-06834-6.

5. Nguyen T.-T. Multi-response performance optimization of burnishing operation for improving hole quality // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. – 2021. – Vol. 43 (12). – P. 560. – DOI: 10.1007/s40430-021-03274-0.

6. Shirsat U., Ahuja B., Dhuttargaon M. Effect of burnishing parameters on surface finish // *Journal of the Institution of Engineers (India): Series C*. – 2017. – Vol. 98. – P. 431–436. – DOI: 10.1007/s40032-016-0320-3.

7. Kurkute V., Chavan S.T. Modeling and optimization of surface roughness and microhardness for roller burnishing process using response surface methodology for Aluminum 63400 alloy // *Procedia Manufacturing*. – 2018. – Vol. 20. – P. 542–547. – DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.081.

8. Patel K.A., Brahmabhatt P.K. Response surface methodology-based desirability approach for optimization of roller burnishing process parameter // *Journal of the Institution of Engineers (India): Series C*. – 2018. – Vol. 99. – P. 729–736. – DOI: 10.1007/s40032-017-0368-8.

9. Prasad K.A., John M.R.S. Optimization of external roller burnishing process on magnesium silicon carbide metal matrix composite using response surface methodology // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. – 2021. – Vol. 43 (7). – P. 342. – DOI: 10.1007/s40430-021-03069-3.

10. Using specially designed high-stiffness burnishing tool to achieve high-quality surface finish / B. Tadic, P.M. Todorovic, O. Luzanin, D. Miljanic, B.M. Jeremic, B. Bogdanovic, D. Vukelic // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2013. – Vol. 67. – P. 601–611. – DOI: 10.1007/s00170-012-4508-2.

11. El-Khabeery M.M., El-Axir M.H. Experimental techniques for studying the effects of milling roller burnishing parameters on surface integrity // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2001. – Vol. 41 (12). – P. 1705–1719. – DOI: 10.1016/S0890-6955(01)00036-0.

12. Development and burnishing characteristics of roller burnishing method with rolling and sliding effects /

M. Okada, S. Suenobu, K. Watanabe, Y. Yamashita, N. Asakawa // *Mechatronics*. – 2015. – Vol. 29. – P. 110–118. – DOI: 10.1016/j.mechatronics.2014.11.002.

13. Surface layer modification by cryogenic burnishing of Al 7050-T7451 alloy and validation with FEM-based burnishing model / B. Huang, Y. Kaynak, Y. Sun, I.S. Jawahir // *Procedia CIRP*. – 2015. – Vol. 31. – P. 1–6. – DOI: 10.1016/j.procir.2015.03.097.

14. Caudill J., Schoop J., Jawahir I.S. Correlation of surface integrity with processing parameters and advanced interface cooling/lubrication in burnishing of Ti-6Al-4V alloy // *Advances in Materials and Processing Technologies*. – 2019. – Vol. 5 (1). – P. 53–66. – DOI: 10.1080/2374068X.2018.1511215.

15. Rotella G., Rinaldi S., Filice L. Roller burnishing of Ti6Al4V under different cooling/lubrication conditions and tool design: effects on surface integrity // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2020. – Vol. 106 (1). – P. 431–440. – DOI: 10.1007/s00170-019-04631-z.

16. Kulkarni P., Chinchani S. A review on machining of nickel-based superalloys using nanofluids under minimum quantity lubrication (NFMQL) // *Journal of the Institution of Engineers (India): Series C*. – 2023. – Vol. 104 (1). – P. 183–199. – DOI: 10.1007/s40032-022-00905-w.

17. Kulkarni P., Chinchani S. Modeling turning performance of Inconel 718 with hybrid nanofluid under MQL using ANN and ANFIS // *Frattura ed Integrità Strutturale*. – 2024. – Vol. 18 (70). – P. 71–90. – DOI: 10.1080/2374068X.2024.2307103.

18. Kulkarni P., Chinchani S. Machining effects and multi-objective optimization in Inconel 718 turning with unitary and hybrid nanofluids under MQL // *Frattura ed Integrità Strutturale*. – 2024. – Vol. 18 (68). – P. 222–241. – DOI: 10.3221/IGF-ESIS.68.15.

19. Kulkarni P., Chinchani S. Machinability of Inconel 718 using unitary and hybrid nanofluids under minimum quantity lubrication // *Advances in Materials and Processing Technologies*. – 2024. – P. 1–29. – DOI: 10.1080/2374068X.2024.2307103.

20. Дзиведи Р., Соматкар А., Чинчаникар С. Моделирование и оптимизация процесса накатывания роликом Al6061-T6 для достижения минимального отклонения от круглости, минимальной шероховатости поверхности и повышения ее микротвердости // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2024. – Т. 26, № 3. – С. 52–65. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.3-52-65.

21. Чинчаникар С., Гейдж М.Г. Моделирование рабочих характеристик и мультикритериальная оптимизация при токарной обработке нержавеющей стали AISI 304 (12X18H10T) резцами с износостойким покрытием и с износостойким покрытием, подвергнутым микропескоструйной обработке // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 117–135. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-117-135.

22. Chinchani S., Choudhury S.K. Effect of work material hardness and cutting parameters on performance of coated carbide tool when turning hardened steel: an optimization approach // *Measurement*. – 2013. – Vol. 46 (4). – P. 1572–1584. – DOI: 10.1016/j.measurement.2012.11.032.

23. Gaikwad V.S., Chinchani S. Mechanical behaviour of friction stir welded AA7075-T651 joints considering the effect of tool geometry and process parameters // *Advances in Materials and Processing Technologies*. – 2022. – Vol. 8 (4). – P. 3730–3748. – DOI: 10.1080/2374068X.2021.1976554.

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



Comparative evaluation of roller burnishing of Al6061-T6 alloy under dry and nanofluid minimum quantity lubrication conditions

Avinash Somatkar^{1, 2, a}, Rashmi Dwivedi^{2, b}, Satish Chinchani^{3, c, *}

¹ Department of Mechanical Engineering, Vishwakarma Institute of Information Technology, Pune, 411048, India

² Mechanical Engineering Department, Sri Satya Sai University of Technology & Medical Science, Sehore, Madhya Pradesh, 466001, India

³ Department of Mechanical Engineering, Vishwakarma Institute of Technology, Pune, 411037, India

^a <https://orcid.org/0000-0002-2885-2104>, avinash.somatkar@viit.ac.in; ^b <https://orcid.org/0000-0002-9755-5330>, rashmidwivedi29@gmail.com;

^c <https://orcid.org/0000-0002-4175-3098>, satish.chinchani@viit.ac.in

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 30 September 2024

Revised: 10 October 2024

Accepted: 14 October 2024

Available online: 15 December 2024

Keywords:

Roller burnishing

Al6061-T6

Nanofluid

MQL

Optimization

ABSTRACT

Introduction. Roller burnishing is one of the most popular methods for improving the surface quality of a workpiece, increasing its wear resistance, microhardness and corrosion resistance. During the processing, the workpiece is compressed and smoothed under the pressure of hardened roller. **Purpose of the work.** The results of the research show that the introduction of minimum quantity lubrication (MQL) during roller burnishing makes it possible to increase the efficiency of the process by reducing friction and improving lubrication. Studies have shown that the use of nanofluids under MQL conditions improves the machining performance. However, very little attention has been paid to the roller burnishing of Al6061-T6 alloy under nano minimum quantity lubrication (NFMQL) conditions. **The methods of investigation.** In light of this, this study compares the performance of roller burnishing of Al6061-T6 alloy under dry friction conditions and NFMQL conditions. The microhardness, roundness, and surface roughness are evaluated, modeled, and optimized in the study by considering the cutting speed, feed rate, and number of passes. Based on the experimental results, mathematical models are established to predict the surface roughness, microhardness, and roundness deviation. **Results and Discussion.** The developed models of surface roughness, microhardness and roundness deviation show the R-square value higher than 0.9, which allows these models to be confidently used to predict the studied responses under dry friction conditions and under NFMQL conditions within the parameter domain selected in this work. According to this study, the machining performed in four passes at a cutting speed of 357 rpm and a tool feed of 0.17 mm/rev can obtain the lowest roundness deviation (3.514 μm), the best microhardness (130.19 HV) and the lowest surface roughness (0.64 μm). Further, the study shows that increasing the number of passes (more than four) does not lead to a significant improvement in surface roughness or microhardness. However, it leads to a slight increase in roundness deviation. Therefore, it is recommended to use a maximum of four passes during roller burnishing of Al6061-T6 aluminum alloy specimens under dry friction conditions to achieve optimal results. The obtained results imply that roller burnishing can effectively improve the overall surface quality and hardness of the workpiece. In addition, roller burnishing is regarded as an affordable method to enhance the functionality and strength of the machined parts by reducing the occurrence of surface defects such as scratches and cracks. It is found that the surface roughness decreases with the increase of the cutting speed. However, it is observed to increase under both dry friction and NFMQL conditions when the cutting speed is increased to 360–380 rpm. Moreover, it is found to decrease with the increase of the feed and the number of passes. But after three or four passes at a feed rate of 0.2–0.25 mm/rev, a noticeable increase in the surface roughness is observed. It is noticed that with the increase of the feed, the microhardness and the roundness deviation increase. In addition, as the number of passes increases, the roundness deviation decreases and the microhardness increases. The number of passes under dry friction condition and feed rate under NFMQL rolling has significant effects on the surface roughness. The cutting speed seems to have the greatest effect on the microhardness, followed by feed rate and the number of passes. On the other hand, the effect of increasing microhardness under NFMQL conditions seems to be stronger. Under dry friction condition, the cutting speed has a significant effect on the roundness deviation, and under NFMQL conditions, the feed rate has an effect.

For citation: Somatkar A., Dwivedi R., Chinchani S. Comparative evaluation of roller burnishing of Al6061-T6 alloy under dry and nanofluid minimum quantity lubrication conditions. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 4, pp. 57–74. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-57-74. (In Russian).

* Corresponding author

Satish Chinchani, D.Sc. (Engineering), Professor

Vishwakarma Institute of Technology,

411037, Pune, India

Tel.: +91-2026950401, e-mail: satish.chinchani@viit.ac.in

References

1. Rodríguez A., López de Lacalle L.N., Celaya A., Fernández A., Lamikiz A. Ball burnishing application for finishing sculptured surfaces in multi-axis machines. *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, 2011, vol. 4, pp. 220–237. DOI: 10.1504/IJMMS.2011.041470.
2. Saffar S., Eslami H. Increasing the fatigue life and surface improvement of AL7075 alloy T6 by using ultrasonic ball burnishing process. *International Journal of Surface Science and Engineering*, 2022, vol. 16 (3), pp. 181–206. DOI: 10.1504/IJSURFSE.2022.125438.
3. Somatkar A.A., Dwivedi R., Chinchani S. Enhancing surface integrity and quality through roller burnishing: a comprehensive review of parameters optimization, and applications. *Communications on Applied Nonlinear Analysis*, 2024, vol. 31 (1s), pp. 51–69. DOI: 10.52783/cana.v31.563.
4. Nguyen T.-T., Nguyen T.-A., Trinh Q.-H., Le X.-B., Pham L.-H., Le X.-H. Artificial neural network-based optimization of operating parameters for minimum quantity lubrication-assisted burnishing process in terms of surface characteristics. *Neural Computing and Applications*, 2022, vol. 34 (9), pp. 7005–7031. DOI: 10.1007/s00521-021-06834-6.
5. Nguyen T.-T. Multi-response performance optimization of burnishing operation for improving hole quality. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2021, vol. 43 (12), p. 560. DOI: 10.1007/s40430-021-03274-0.
6. Shirsat U., Ahuja B., Dhuttargaon M. Effect of burnishing parameters on surface finish. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 2017, vol. 98, pp. 431–436. DOI: 10.1007/s40032-016-0320-3.
7. Kurkute V., Chavan S.T. Modeling and optimization of surface roughness and microhardness for roller burnishing process using response surface methodology for Aluminum 63400 alloy. *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 20, pp. 542–547. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.081.
8. Patel K.A., Brahmabhatt P.K. Response surface methodology-based desirability approach for optimization of roller burnishing process parameter. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series C*, 2018, vol. 99, pp. 729–736. DOI: 10.1007/s40032-017-0368-8.
9. Prasad K.A., John M.R.S. Optimization of external roller burnishing process on magnesium silicon carbide metal matrix composite using response surface methodology. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2021, vol. 43 (7), p. 342. DOI: 10.1007/s40430-021-03069-3.
10. Tadic B., Todorovic P.M., Luzanin O., Miljanic D., Jeremic B.M., Bogdanovic B., Vukelic D. Using specially designed high-stiffness burnishing tool to achieve high-quality surface finish. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 67, pp. 601–611. DOI: 10.1007/s00170-012-4508-2.
11. El-Khabeery M.M., El-Axir M.H. Experimental techniques for studying the effects of milling roller-burnishing parameters on surface integrity. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2001, vol. 41 (12), pp. 1705–1719. DOI: 10.1016/S0890-6955(01)00036-0.
12. Okada M., Suenobu S., Watanabe K., Yamashita Y., Asakawa N. Development and burnishing characteristics of roller burnishing method with rolling and sliding effects. *Mechatronics*, 2015, vol. 29, pp. 110–118. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2014.11.002.
13. Huang B., Kaynak Y., Sun Y., Jawahir I.S. Surface layer modification by cryogenic burnishing of Al 7050-T7451 alloy and validation with FEM-based burnishing model. *Procedia CIRP*, 2015, vol. 31, pp. 1–6. DOI: 10.1016/j.procir.2015.03.097.
14. Caudill J., Schoop J., Jawahir I.S. Correlation of surface integrity with processing parameters and advanced interface cooling/lubrication in burnishing of Ti-6Al-4V alloy. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2019, vol. 5 (1), pp. 53–66. DOI: 10.1080/2374068X.2018.1511215.
15. Rotella G., Rinaldi S., Filice L. Roller burnishing of Ti6Al4V under different cooling/lubrication conditions and tool design: effects on surface integrity. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 106 (1), pp. 431–440. DOI: 10.1007/s00170-019-04631-z.
16. Kulkarni P., Chinchani S. A review on machining of nickel-based superalloys using nanofluids under minimum quantity lubrication (NFMQL). *Journal of the Institution of Engineers (India): Series C*, 2023, vol. 104 (1), pp. 183–199. DOI: 10.1007/s40032-022-00905-w.
17. Kulkarni P., Chinchani S. Modeling turning performance of Inconel 718 with hybrid nanofluid under MQL using ANN and ANFIS. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2024, vol. 18 (70), pp. 71–90. DOI: 10.1080/2374068X.2024.2307103.

18. Kulkarni P., Chinchani S. Machining effects and multi-objective optimization in Inconel 718 turning with unitary and hybrid nanofluids under MQL. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2024, vol. 18 (68), pp. 222–241. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.68.15.
19. Kulkarni P., Chinchani S. Machinability of Inconel 718 using unitary and hybrid nanofluids under minimum quantity lubrication. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2024, pp. 1–29. DOI: 10.1080/2374068X.2024.2307103.
20. Dwivedi R., Somatkar A., Chinchani S. Modeling and optimization of roller burnishing of Al6061-T6 process for minimum surface roughness, better microhardness and roundness. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 3, pp. 52–65. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.3-52-65.
21. Chinchani S., Gadge M.G. Performance modeling and multi-objective optimization during turning AISI 304 stainless steel using coated and coated-microblasted tools. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 4, pp. 117–135. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-117-135. (In Russian).
22. Chinchani S., Choudhury S.K. Effect of work material hardness and cutting parameters on performance of coated carbide tool when turning hardened steel: an optimization approach. *Measurement*, 2013, vol. 46 (4), pp. 1572–1584. DOI: 10.1016/j.measurement.2012.11.032.
23. Gaikwad V.S., Chinchani S. Mechanical behaviour of friction stir welded AA7075-T651 joints considering the effect of tool geometry and process parameters. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2022, vol. 8 (4), pp. 3730–3748. DOI: 10.1080/2374068X.2021.1976554.

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>).