Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2024 Том 26 № 3 с. 52–65
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.3-52-65

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

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

Моделирование и оптимизация процесса накатывания роликом Al6061-T6 для достижения минимального отклонения от круглости, минимальной шероховатости поверхности и повышения ее микротвердости

Рашми Двиведи [1, a], ***Авинаш Соматкар*** [1, 2, b], ***Сатиш Чинчаникар*** [2, c, *]

[1] Университет технологий и медицинских наук Шри Сатья Саи, Сехор, Мадхья-Прадеш, 466001, Индия
[2] Институт информационных технологий Вишвакармы, Кондва (Бадрек), Пуне – 411048, Махараштра, Индия

[a] https://orcid.org/0000-0002-9755-5330, rashmidwivedi29@gmail.com; [b] https://orcid.org/0000-0002-2885-2104, avinash.somatkar@viit.ac.in;
[c] https://orcid.org/0000-0002-4175-3098, satish.chinchanikar@viit.ac.in

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.787

История статьи:
Поступила: 09 июня 2024
Рецензирование: 17 июня 2024
Принята к печати: 22 июня 2024
Доступно онлайн: 15 сентября 2024

Ключевые слова:
Накатывание роликом
Al6061-T6
Шероховатость поверхности
Микротвердость
Отклонение от круглости
Оптимизация

АННОТАЦИЯ

Введение. Накатывание роликом – один из наиболее распространенных методов повышения качества поверхности деталей, износостойкости, микротвердости и коррозионной стойкости. Процесс включает в себя сжатие и разглаживание заготовки давлением закаленного ролика. Его часто используют для повышения производительности производства и срока службы деталей в таких отраслях, как автомобилестроение, аэрокосмическая промышленность и производство медицинского оборудования. **Цель работы.** Обзор литературы показывает, что процесс накатывания роликом эффективно улучшает общее качество поверхности и твердость заготовки. Кроме того, накатывание роликом рассматривается как доступный метод повышения функциональности и прочности обрабатываемых деталей за счет снижения вероятности появления поверхностных дефектов, таких как царапины и трещины. Однако было опубликовано очень мало исследований по моделированию и оптимизации накатывания роликом Al6061-T6 для достижения минимального отклонения от круглости, минимальной шероховатости и высокой микротвердости. **Методы исследования.** В текущей работе накатывание роликом Al6061-T6 моделируется и оптимизируется для достижения требуемых значений микротвердости, отклонений от круглости и минимальной шероховатости поверхности. В условиях сухой резки эффективность накатывания роликом образцов Al6061 оценивалась с точки зрения технологических факторов, таких как скорость резания, подача и количество проходов. На основе результатов экспериментов разработаны математические модели для прогнозирования шероховатости поверхности, микротвердости и отклонения от круглости. **Результаты и обсуждение.** Коэффициент корреляции для разработанных моделей оказался близким к 0,9, это свидетельствует о том, что их можно надежно использовать для прогнозирования и оптимизации накатывания роликом в процессе обработки Al6061-T6. Согласно этому исследованию использование следующих параметров обработки приводит к наименьшему отклонению круглости (4,282 мкм), наиболее высокой микротвердости (119,2 HV) и наименьшей шероховатости поверхности (0,802 мкм): скорость резания 344 об/мин, подача 0,25 мм/об и четыре прохода. Кроме того, исследование показывает, что увеличение количества проходов (более четырех) не способствует значительному улучшению шероховатости поверхности или микротвердости. Однако это приводит к небольшому увеличению отклонения от круглости. Поэтому для достижения оптимальных результатов рекомендуется использовать максимум четыре прохода при накатывании роликом образцов из Al6061 в условиях сухой резки. Эти результаты подразумевают, что накатывание роликом может эффективно улучшить общее качество и твердость поверхности заготовки. Кроме того, накатывание роликом рассматривается как доступный метод повышения функциональности и прочности обрабатываемых деталей за счет снижения вероятности появления поверхностных дефектов, таких как царапины и трещины.

Для цитирования: *Двиведи 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.

Введение

Качество поверхности заготовок, полученных в результате различных процессов обработки металлов давлением и механической обработки, повышается с помощью традиционных

***Адрес для переписки**
Чинчаникар Сатиш, д.т.н., профессор
Институт информационных технологий Вишвакармы,
Кондва (Бадрек), Пуне – 411048, Махараштра, Индия
Тел.: +91-2026950401, **e-mail:** satish.chinchanikar@viit.ac.in

методов удаления стружки – шлифования, доводки и шабрения. Тем не менее все еще проводятся исследования, направленные на поиск новых способов производства заготовок за один процесс и отказ от вторичных процедур отделки. Это связано с тем, что более высокие стандарты качества отделки, снижение производственных затрат и сокращение времени производства повышают конкурентоспособность.

Одним из наиболее широко применяемых методов обработки поверхностей является полирование, которое проводят на различных металлических заготовках с помощью валковых и шаровых форм. Полирование – это процесс, который сглаживает дефекты поверхности металла, улучшая его блеск и долговечность, и обычно используется в таких отраслях, как автомобилестроение, авиакосмическая промышленность и производство ювелирных изделий. Процедура полирования улучшает качество поверхности заготовки на микроскопическом уровне без образования сколов. Это типичный метод отделки, применяемый на фрезерных или токарных станках для повышения качества поверхности, износостойкости, микротвердости и коррозионной стойкости [1]. Крайне важно добиться высокого уровня качества поверхности после полировки [2].

В сочетании с машинной подачей напряжение полировального устройства, превышающее предел текучести, искажает микромасштабные вершины поверхности и заполняет впадины на полируемой длине [3, 4]. Полированные материалы приобретают более четкую внешнюю форму из-за пластической деформации, чему способствует постоянное воздействие полировального инструмента на поверхность заготовки. Установлено, что прикладываемое к заготовке усилие и количество проходов, совершаемых при полировальной операции, напрямую связаны с твердостью заготовки. Такое полирование обычно выполняется без использования каких-либо смазок. Различные параметры процесса полирования, включая тип взаимодействия при полировании, количество проходов, скорость и глубина полирования (сухого или мокрого), были предметом различных исследований [5, 6].

Объединив процессы накатывания роликом и электрохимического точения, Эбейд и Эй-Тавил (Ebeid and Ei-Taweel) [7] исследовали шероховатость поверхности и увеличение скорости удаления материала при обработке сплава Al-Zn-Mg. Для определения лучших качеств были исследованы результаты экспериментов с использованием стратегии Тагучи. В свою очередь, Луо и др. (Luo et al.) [8] исследовали влияние подачи, скорости и глубины входа на мощность формообразования в машине для обработки латуни H62 и алюминиевого композита LY12 с применением инструмента из поликристаллического драгоценного камня. Результаты показали, что на силу полировки больше всего влияют такие факторы, как глубина внедрения инструмента, подача и скорость.

Одним из достижений в области накатки является одновременное использование скольжения и качения для улучшения качества поверхности круглых и полых металлических заготовок, изготовленных из сталей ASTM 2017 и ASTM 1055. Влияние глубины внедрения инструмента, подачи и скорости обработки также было различно для заготовок из разных материалов [9]. Накатка роликом применялась Сундарараджаном и Нагараджаном (Sundararajan and Nagarajan) [10] для улучшения качества поверхности заготовки из стали EN8. Полирование проводилось при скорости вращения вала от 100 до 2700 об/мин и при постоянной скорости подачи. Анализ шероховатости поверхности и твердости стали C40E во время полирования провели Кумар и др. (Kumar et al.) [11]. Параметрами накатки были скорость, подача, глубина внедрения инструмента и количество проходов.

Пшибыльский (Przybylski) [12] выполнил механическую обработку с последующей накаткой. Его исследование показало, что выполнение накатки сразу после механической обработки на том же станке сокращает время сборки и избавляет от дополнительных операций отделки. Ширсат и др. (Shirsat et al.) [13] исследовали параметрическое влияние усилия, скорости, подачи, ширины заготовки и габаритов шарика на поверхность металлического материала после накатки. В исследовании использовались масла марок SAE 20, 30, 40 и SAE 50. Их исследование показало, что применение масла SAE 30 обеспечивает наилучшее качество поверхности, а усилие, прилагаемое к заготовке при накатке, оказывает наибольшее влияние на готовую поверхность по сравнению с другими параметрами процесса, которые рассматривались в иссле-

довании. В цикле накатки роликом заготовки из титанового сплава ТА2 Юань и др. (Yuan et al.) [14] представили оригинальную методику выбора рациональных границ полирования, таких как скорость, подача и глубина внедрения инструмента. Полученные в результате моделирования границы отражают неровности поверхности и микротвердость внешнего слоя полученной заготовки. Проведены различные исследования в рамках этой классификации [15, 16].

Кобаноглу и Озтюрк (Cobanoglu and Ozturk) [17] исследовали качество поверхности и микротвердость углеродистой стали AISI 1040 в процессе полирования роликом. Параметрами обработки были скорость, подача и сила полирования. Пробные испытания были выполнены с использованием метода Тагучи. Для определения влияния каждого параметра процесса на поверхность и микротвердость применялся дисперсионный анализ (ANOVA). Исследование показало, что величина подачи существенно влияет на качество поверхности в процессе полирования роликом. Несколько исследований показали, что разработанная система полирования увеличивает срок службы металлических изделий и их износостойкость [18, 19].

Из рассмотренной литературы следует, что процесс накатки роликом эффективно улучшает общее качество поверхности и твердость обрабатываемой детали. Кроме того, накатка роликом считается доступным методом повышения функциональности и надежности обработанных деталей за счет снижения вероятности появления дефектов поверхности, таких как царапины и трещины. Однако было опубликовано очень мало исследований по моделированию и оптимизации процесса накатки роликом сплава Al6061-T6 для получения минимальной шероховатости поверхности, лучшей микротвердости и круглости. ***С этой целью*** в рамках данного исследования была проведена накатка роликом заготовки из сплава Al6061-T6 для моделирования и оптимизации процесса, обеспечивающего высокую микротвердость, минимальное отклонение от круглости и минимальную шероховатость поверхности. Накатка образцов из сплава Al6061 роликами оценивалась в условиях сухого резания с учетом таких факторов, как скорость резания, подача и количество проходов. На основе результатов экспериментов были разработаны математические модели для прогнозирования шероховатости поверхности, микротвердости и отклонения от круглости.

Материалы и методы исследования

В настоящем исследовании использован алюминиевый сплав 6061 (Al6061-T6), имеющий общее применение. Этот сплав известен своим отношением предела прочности к весу, коррозионной стойкостью и свариваемостью, что делает его подходящим для различных конструкционных компонентов и популярным в производственных процессах. Это дисперсионно-твердеющий алюминиевый сплав. Магний и кремний являются двумя наиболее важными его компонентами. Главное преимущество алюминиевого сплава 6061 – его хорошая свариваемость. Выбранный образец имеет диаметр 30 мм и длину 160 мм. Длина каждой обрабатываемой поверхности составляла 50 мм. Такая деталь-представитель очень часто встречается в конструкциях самолетов. Свойства и химический состав алюминиевого сплава 6061 приведены в табл. 1.

В настоящем исследовании использовался один твердосплавный накатной ролик. Твердосплавный ролик подпружинен в двух осевых направлениях и обеспечивает необходимое давление во время операции полирования. Изношенный твердосплавный ролик можно восстановить путем переточки/притирки, что продлит срок службы инструмента. Инструмент с твердосплавным роликом подходит для

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
Количество (масс. %)	95,8	0,15	0,2	1,1	0,15	0,75	0,25	0,19	0,15

всех наружных поверхностей валов, конических валов, радиусов, уступов и других, он может применяться на токарных станках с ЧПУ, револьверных или обычных токарных станках. С предварительно обточенной поверхности полированием можно снять слой толщиной от 0,1 до 0,2 мкм. Инструмент для накатки роликом, использованный в настоящем исследовании, показан на рис. 1.

Рис. 1. Инструмент для накатывания роликом, использованный в настоящем исследовании

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

Эксперименты проводились при варьировании подачи, скорости, количества проходов и при постоянной глубине внедрения инструмента 0,5 мм. Для понимания критических факторов, влияющих на показатели устойчивости (шероховатость поверхности, микротвердость и отклонение от круглости), использовали планирование эксперимента (DOE). Центральный композиционный план (CCD) применялся для разработки эмпирических моделей и анализа всех откликов. Для планирования экспериментов использовалась тестовая матрица с ротатабельным центральным композиционным планированием (CCRD) со значением альфа 1,6817. Каждый числовой параметр варьировался по пяти уровням: плюс и минус альфа (осевые точки), плюс и минус единица (факториальные точки) и центральная точка. В этом исследовании было проведено двадцать экспериментов по накатке роликами, варьирующихся в зависимости от параметров процесса, для разработки моделей шероховатости поверхности, микротвердости и ошибок отклонения от круглости. Кодированные уровни и соответствующие им фактические значения параметров резания приведены в табл. 2.

Средние значения шероховатости поверхности измерены с помощью автономного устройства Taylor Hobson Talysurf на оборудовании Surtronic Duo. Шероховатость поверхности измеряли в трех равноотстоящих друг от друга точках по окружности заготовки для получения статистически значимого значения. Отклонение от круглости измерялось с помощью КИМ портального типа (производитель: Zeiss, модель: Contura, диапазон: 1200×800×800 мм). Геометрические отклонения были получены путем измерения округлости в двенадцати сечениях калибруемой площади с использованием микрометрического индикатора часового типа с диапазоном измерения 12,5 мм, ценой деления 0,001 мм и предельно допустимой погрешностью (ПДП) 4 мкм. Микротвердость измеряли микротвердомером по Виккерсу с использованием алмазного индентора с углом 136° на 100 грамм и временем выдержки 20 секунд.

Таблица 2

Table 2

Кодированные уровни и соответствующие фактические параметры резания

Coded levels and corresponding actual cutting parameters

Параметры	Уровни для значения альфа, равного				
	–1,6817	–1	0	+1	+1,6817
Скорость резания *V*, об/мин	100	200	300	400	500
Подача *f*, мм/об	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
Количество проходов *N* (mm)	0,5	1	1,5	2	2,5
Глубина внедрения, мм	0,5				

Результаты и их обсуждение

В этом разделе на основе разработанных уравнений регрессии обсуждается влияние параметров процесса накатки роликом на реакции процесса. Кривые, показывающие различные реакции, построены путем изменения одного из входных параметров и сохранения других параметров постоянными, чтобы понять физику процесса и влияние параметров резания на различные реакции. Кроме того, определен вклад параметров резания в различные реакции, а также получены данные о влиянии параметров резания на различные реакции. Наконец, для оптимизации технологических характеристик при накатке роликами сплава Al6061-T6 использовался функциональный подход, основанный на желательности.

Были проведены эксперименты с изменением скорости резания, подачи и количества проходов (входных параметров). Экспериментальная матрица и результаты определения шероховатости поверхности, микротвердости и максимального отклонения от круглости при накатке роликами сплава Al6061-T6 приведены в табл. 3.

Таблица 3

Table 3

Матрица эксперимента накатывания роликом

Roller burnishing experimental matrix

Скорость резания V, об/мин	Подача f, мм/об	Количество проходов N	Шероховатость поверхности Ra, мкм	Микротвердость HV	Отклонение от круглости Re, мкм
300	0,2	3	0,81	117	7,7
200	0,15	2	0,82	114	9,6
200	0,15	4	0,89	116	8,6
200	0,25	2	0,92	116	5,4
200	0,25	4	0,9	125	8,7
400	0,15	2	0,94	118	10,1
400	0,15	4	0,84	111	1,6
400	0,25	2	0,97	110	8,4
400	0,25	4	0,79	113	2,9
300	0,2	3	0,81	117	8,4
300	0,2	3	0,81	117	8,6
100	0,2	3	0,92	112	13,2
500	0,2	3	0,93	104	4,2
300	0,1	3	0,94	123	1,5
300	0,3	3	0,96	124	2
300	0,2	1	0,95	123	8,7
300	0,2	5	0,86	125	4
300	0,2	3	0,83	117	6,9
300	0,2	3	0,82	113	8,3
300	0,2	3	0,81	118	8,7

Были получены следующие уравнения:

$$Ra = 0,9734 + 3,38068 \cdot 10^{-4} V - 2,7693 f + 0,0563 N - 3,25 \cdot 10^{-3} Vf - 4,125 \cdot 10^{-4} VN - 0,425 fN + 2,6136 \cdot 10^{-6} V^2 + 12,9545 f^2 + 0,02113 N^2; \quad (1)$$

$$\text{HV} = 119,534 + 0,2611 V - 233,0681 f - 12,0056 N - 0,425 Vf - 0,0187 VN + 42,5 fN - 2,3636 \cdot 10^{-4} V^2 + 604,5454 f^2 + 1,6363 N^2; \quad (2)$$

$$Re = -9,525 + 0,01281 V + 157,125 f + 3,3937 N + 0,0925 Vf - 0,0203 VN + 18,25 fN + 2,125 \cdot 10^{-5} V^2 - 610 f^2 - 0,375 N^2. \quad (3)$$

Адекватность разработанных уравнений была проверена методом дисперсионного анализа (ANOVA). *R*-квадрат – это коэффициент множественных определений, который измеряет долю вариаций в точках данных. Всегда желательно, чтобы коэффициент корреляции (*R*-квадрат (*R*-Squared)) находился в диапазоне от –1 до +1. Уравнение имеет смысл, если *R* очень близко к +1. Скорректированный *R*-квадрат (Adjusted *R*-Squared) – это показатель степени отклонения от среднего значения, объясняемого моделью. Прогнозируемый *R*-квадрат (Predicted *R*-Squared) – это показатель того, насколько хорошо модель предсказывает значение отклика. Скорректированные и прогнозируемые значения *R*-квадрата должны отличаться друг от друга примерно на 0,20, чтобы обеспечить «приемлемое соответствие». Если это не так, то проблема, возможно, связана либо с данными, либо с моделью. Достаточная точность – это показатель диапазона прогнозируемого отклика на связанную с ним ошибку, другими словами, отношение сигнал/шум. Его желаемое значение равно четырем или более. Результаты ANOVA для определения шероховатости поверхности, микротвердости и погрешности круглости при шлифовании заготовки валиком приведены в табл. 4. Результаты ANOVA для определения шероховатости поверхности показывают, что модельное значение $\boldsymbol{F}$ равно 46,91, – это означает, что модель является значимой. Значения «Prob > $\boldsymbol{F}$» менее 0,0500 указывают на то, что условия модели являются значимыми. В этом случае $\boldsymbol{f}$, $\boldsymbol{N}$, $\boldsymbol{V}\times\boldsymbol{f}$, $\boldsymbol{V}\times\boldsymbol{N}$, $\boldsymbol{f}\times\boldsymbol{N}$, $\boldsymbol{V}_2$, $\boldsymbol{f}_2$, $\boldsymbol{N}_2$ являются значимыми условиями модели. Результаты ANOVA для определения микротвердости показывают, что модельное значение $\boldsymbol{F}$ равно 11,99, следовательно, модель является значимой. Вероятность того, что такое большое модельное значение $\boldsymbol{F}$ могло возникнуть из-за шума, составляет всего 0,03 %. В этом случае $\boldsymbol{V}$, $\boldsymbol{V}\times\boldsymbol{f}$, $\boldsymbol{V}\times\boldsymbol{N}$, $\boldsymbol{f}\times\boldsymbol{N}$, $\boldsymbol{V}_2$, $\boldsymbol{f}_2$, $\boldsymbol{N}_2$ являются значимыми модельными параметрами. Результаты анализа отклонений от круглости, полученные с помощью ANOVA, показывают, что модельное значение $\boldsymbol{F}$, равное 17,62, означает, что модель является значимой. В этом случае $\boldsymbol{V}$, $\boldsymbol{N}$, $\boldsymbol{V}\times\boldsymbol{N}$, $\boldsymbol{f}\times\boldsymbol{N}$, $\boldsymbol{f}_2$ являются значимыми модельными терминами.

Значения *R*-квадрата, которые измеряют долю вариаций в точках данных, превышают 0,9 для всех разработанных моделей. Таким образом, разработанные эмпирические уравнения являются надежными для прогнозирования шероховатости поверхности, микротвердости и отклонения от круглости при вальцовой полировке сплава Al6061-T6 (уравнения (1–3)).

Для лучшего понимания путем изменения скорости резания, подачи и количества проходов с использованием разработанных уравнений (1–3) соответственно построены двухмерные (2D) графики. Кривые, показывающие шероховатость поверхности, микротвердость и отклонение от круглости, строятся путем изменения одного из входных параметров и сохранения постоянными других параметров. На рис. 2, *а* показано изменение измеренных характеристик в зависимости от скорости резания, построенное с использованием значения подачи 0,2 мм/об и трех проходов. Можно видеть, что шероховатость поверхности уменьшается с повышением скорости резания до 360…380 об/мин, а затем увеличивается. Видно также, что микротвердость увеличивается с повышением скорости резания. Однако существует

Таблица 4

Table 4

Дисперсионный анализ (ANOVA) для определения шероховатости поверхности, микротвердости и отклонения от круглости

ANOVA for surface roughness, microhardness, and roundness

Факторы	Шероховатость поверхности *Ra*	Микротвердость HV	Отклонение от круглости *Re*
R-квадрат	0,9769	0,9152	0,9407
Скорректированный *R*-квадрат	0,956	0,8389	0,8873
Прогнозируемый *R*-квадрат	0,8472	0,855	0,8933
Адекватная точность	19,328	15,464	16,002
F-значение модели	46,91	11,99	17,62

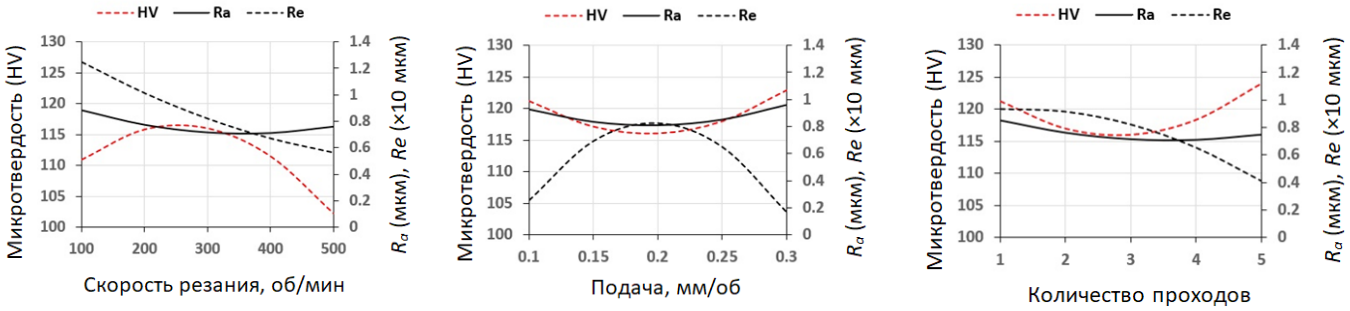


Рис. 2. Отклики, изменяющиеся в зависимости от (*а*) скорости резания, (*б*) подачи и (*в*) количества проходов

Fig. 2. Responses varying with (*а*) cutting sped, (*б*) feed, and (*в*) number of passes

оптимум, и его можно рассматривать как уменьшающийся при превышении скорости резания в 280…300 об/мин. С другой стороны, отклонение от круглости может уменьшаться с увеличением скорости резания.

На рис. 2, *б* показано изменение измеренных характеристик в зависимости от подачи, построенное с использованием значения скорости резания 300 об/мин и трех проходов. На рис. 2, *в* показано изменение измеренных характеристик в зависимости от количества проходов, построенное с использованием значения скорости резания 300 об/мин и подачи 0,2 мм/об.

На рис. 2, *б* можно увидеть оптимальные значения для откликов, изменяющихся в зависимости от подачи. Минимальную погрешность в шероховатости и круглости поверхности можно получить при подаче в диапазоне 0,18…0,22 мм/об, скорости резания 300 об/мин и трех проходах. При этом максимальной микротвердости можно добиться, используя более высокие значения подачи. При увеличении подачи до 0,2 мм/об можно наблюдать снижение шероховатости поверхности и микротвердости, а также увеличение отклонения от круглости. Однако эти реакции можно рассматривать как изменение тенденций, выходящих за пределы значения подачи 0,2 мм/об.

Минимальное отклонение от круглости и максимальную микротвердость можно получить, используя как меньшую, так и бóльшую подачу. Однако минимальную шероховатость поверхности можно получить при подаче в диапазоне 0,18…0,22 мм/об. Можно заметить, что шероховатость поверхности уменьшается с увеличением числа проходов. Однако при четырех проходах не видно существенного эффекта в снижении шероховатости поверхности. Погрешность в определении круглости может быть сведена к минимуму при увеличении числа проходов. Аналогичным образом максимальная микротвердость может быть достигнута при большем количестве проходов.

Результаты ANOVA для ***F***-значений шероховатости поверхности, микротвердости и погрешности круглости приведены в табл. 5. Факторы, которые оказали существенное влияние на результаты, подчеркнуты. Аналогично процентные доли различных элементов, полученные путем деления ***F***-значения соответствующего элемента на общее ***F***-значение, также приведены в табл. 5. Можно видеть, что на шероховатость поверхности в основном влияет более высокая величина подачи (почти 30,76 %), за которой следует более высокая величина скорости резания, а также эффект взаимодействия скорости резания и количества проходов (почти 20 и 15,88 % соответственно), при этом скорость резания и подача оказывают незначительное влияние. Однако можно считать, что количество проходов имеет большое значение для снижения шероховатости поверхности. Процентное соотношение этих важных параметров модели выделено жирным шрифтом в табл. 5.

Что касается микротвердости, скорости резания и взаимодействующих элементов, то эффекты и элементы более высокого порядка могут рассматриваться как значимые в зависимости от подачи и количества проходов. Можно видеть, что на микротвердость в основном влияет более высокий уровень скорости резания (почти 31,02 %), за которым следует скорость резания

Таблица 5
Table 5

Дисперсионный анализ (ANOVA) для определения *F*-значений и процентного вклада различных параметров

ANOVA for *F*-values and % contribution of different parameters

Элементы	Шероховатость поверхности *Ra*		Микротвердость HV		Отклонение от круглости *Re*	
	F-значения	Процентный вклад	*F*-значения	Процентный вклад	*F*-значения	Процентный вклад
Скорость резания *V*, об/мин	0,3382	0,07	15,8251	**16,91**	40,2758	**25,89**
Подача *f*, мм/об	6,3512	1,23	0,6335	0,68	0,6619	0,43
Количество проходов *N*	63,1738	**12,25**	1,5631	1,67	24,0589	**15,47**
Взаимодействие $V \times f$	12,7024	2,46	7,4668	7,98	1,4796	0,95
Взаимодействие $V \times N$	81,8517	**15,88**	5,8132	6,21	28,7154	**18,46**
Взаимодействие $f \times N$	21,7218	4,21	7,4668	7,98	5,7595	3,70
V^2	103,2749	**20,03**	29,0338	**31,02**	0,9816	0,63
f^2	158,5728	**30,76**	11,8708	**1,68**	50,5574	**32,50**
N^2	67,5406	**13,10**	13,9156	**14,87**	3,0571	1,97
Итоговое *F*-значение	515,5274	100	93,5887	100	155,5472	100

* Важные элементы выделены подчеркиванием, а вклады – полужирным шрифтом.

(почти 16,91 %), большее количество проходов и подача (почти 14,87 и 12,68 % соответственно), при этом подача и количество проходов практически не влияют друг на друга (табл. 5). На погрешность круглости оказывает существенное влияние более высокий порядок подачи (почти 32,5 %), за которым следует скорость резания (почти 25,89 %), а также совместное влияние скорости резания и количества проходов (почти 18,46 %) и количества проходов (почти 15,47 %).

Видно также, что количество проходов существенно влияет на шероховатость поверхности, а скорость резания существенно влияет на микротвердость и погрешность круглости. Из рис. 2 и табл. 5 видно, что допустимые отклонения по своей природе противоречат параметрам процесса. Поэтому для получения положительных результатов требуется многоцелевая оптимизация этих противоречивых параметров.

В настоящей работе параметры процесса накатки роликом оптимизированы с использованием метода функции желательности для получения минимальной шероховатости поверхности, максимальной микротвердости и минимальной погрешности круглости. При таком подходе каждая переменная реакции преобразуется в функцию желательности, а оптимизация нескольких переменных реакции преобразуется в оптимизацию одной функции желательности [20–22]. Переменные процесса и диапазон функций реакции приведены в табл. 6.

Минимальные и максимальные пределы шероховатости поверхности, микротвердости и отклонения от круглости получены на основе экспериментальных наблюдений и отражены в табл. 6. Каждая характеристика преобразуется в соответствующую функцию желательности с помощью одностороннего преобразования [16]. В настоящем исследовании была проведена многоцелевая оптимизация процесса накатки роликом с использованием модуля оптимизации программного обеспечения Design-Expert®. Для исследования оптимизации было рассмотрено около 100 точек данных, имеющих различные

Таблица 6
Table 6

Ограничения для оптимизации параметров процесса
Constraints for optimization of process parameters

Параметры	Заданный уровень	Мин. предел	Макс. 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*	Минимизировать	0,79	0,97
Микротвердость HV	Минимизировать	104	125
Отклонение от круглости *Re*	Минимизировать	1,5	13,2

комбинации технологических параметров, в диапазоне, показанном в табл. 6. Для каждого уровня независимых параметров были рассчитаны желательные значения шероховатости поверхности, желательные значения микротвердости и желательные значения погрешности круглости. Затем была рассчитана единая функция желательности, а именно желательность минимальной шероховатости поверхности, максимальной микротвердости и минимальной погрешности круглости. В табл. 7 приведены оптимизированные параметры процесса для минимальной шероховатости поверхности, максимальной микротвердости и минимальной погрешности круглости. В качестве оптимального параметра было выбрано решение, имеющее наивысший уровень желательности, как показано в табл. 7.

В ходе настоящего исследования было установлено, что скорость резания 344 об/мин, скорость подачи 0,25 мм/об и четыре прохода являются оптимальными параметрами для накатки роликом заготовки из сплава Al6061-T6, позволяющими получить минимальную шероховатость поверхности 0,807 мкм, максимальную микротвердость 119,2 HV и минимальную погрешность круглости 4,282 мкм. На основе экспериментальных наблюдений и исследований по оптимизации было установлено, что накатка роликом является лучшим вариантом для получения более совершенной геометрии заготовки из сплава Al6061-T6. Однако это указывает на необходимость дальнейших исследований в области накатки роликом сплавов Al6061-T6 с использованием различных методов охлаждения для получения улучшенной геометрии обработанной поверхности с шероховатостью поверхности, приближающейся к 0,3…0,4 мкм, и более высокой микротвердостью.

Выводы

В настоящей работе была предпринята попытка исследовать процесс накатки роликом сплава Al6061-T6. Можно сделать следующие выводы.

1. Шероховатость поверхности уменьшалась при увеличении скорости резания до 360…380 об/мин, а затем увеличивалась. Микротвердость возрастала с увеличением скорости резания. Однако для нее был некий оптимум, и при достижении скорости резания 280…300 об/мин микротвердость снижалась. С другой стороны, погрешность круглости уменьшалась с увеличением скорости резания.

2. Минимальная погрешность шероховатости и круглости поверхности была получена при значениях подачи в диапазоне 0,18…0,22 мм/об, скорости резания 300 об/мин и трех проходах. Однако максимальная микротвердость была получена при более высоких значениях подачи. Уменьшение шероховатости поверхности и микротвердости, а также увеличение погрешности в определении круглости были замечены при увеличении величины подачи до 0,2 мм/об. Однако было замечено, что при увеличении величины подачи до 0,2 мм/об эти показатели изменяются в лучшую сторону.

3. Минимальная погрешность кругления и максимальная микротвердость были получены при использовании как более низких, так и более высоких значений подачи. Однако мини-

Таблица 7
Table 7

Семейство оптимизированных параметров обработки
A family of optimized process parameters

№	Скорость резания *V*, об/мин	Подача *f*, мм/об	Количество проходов *N*	Шероховатость поверхности *Ra*	Микротвердость HV	Отклонение от круглости *Re*	Желательность
1	344,48	0,25	4	0,807	119,2	4,282	0,7927
2	342,62	0,25	4	0,808	119,3	4,340	0,7926
3	348,05	0,25	4	0,806	118,9	4,172	0,7925
4	347,97	0,25	4	0,805	118,8	4,206	0,7914
5	355,29	0,25	4	0,804	118,2	3,950	0,7909
6	343,96	0,25	4	0,806	119,1	4,359	0,7906
7	345,53	0,25	3,99	0,807	119,1	4,273	0,7905
8	348,67	0,25	3,98	0,806	118,7	4,195	0,7886
9	344,31	0,25	3,97	0,808	119,1	4,346	0,7872
10	335,65	0,24	4	0,805	119,3	4,781	0,7835
11	336,95	0,25	3,94	0,811	119,5	4,623	0,7816
12	342,96	0,25	3,93	0,809	118,9	4,465	0,7799
13	308,15	0,24	4	0,815	121,1	5,762	0,7627
14	315,59	0,25	3,87	0,820	120,6	5,374	0,7610
15	336,65	0,2	4	0,795	116,6	5,236	0,7350
16	349,45	0,15	4	0,840	115,6	2,645	0,7111
17	359,16	0,16	4	0,838	115,1	2,346	0,7102

мальная шероховатость поверхности была получена при использовании значения подачи в диапазоне 0,18…0,22 мм/об). Было замечено, что шероховатость поверхности уменьшается с увеличением количества проходов. Однако не было обнаружено существенного улучшения в снижении шероховатости поверхности после четырех проходов. Отклонение от круглости было сведено к минимуму при увеличении числа проходов, а максимальная микротвердость была достигнута при увеличении числа проходов.

4. На шероховатость поверхности в основном влияла более высокая величина подачи (почти 30,76 %), за которой следует более высокая величина скорости резания и эффект взаимодействия скорости резания и количества проходов (почти 20 и 15,88 % соответственно), при этом скорость резания и подача оказывают незначительное влияние. Однако количество проходов было сочтено значительным для снижения шероховатости поверхности.

5. На микротвердость в основном влиял более высокий уровень скорости резания (почти 31,02 %), за которым следовала скорость резания (почти 16,91 %), количество проходов и величина подачи (почти 14,87 и 12,68 % соответственно), при этом подача и количество проходов практически не влияли (табл. 5). Было обнаружено, что на отклонение от круглости значительно влияет более высокая величина подачи (почти 32,5 %), за которой следуют скорость резания (почти 25,89 %), совместное влияние скорости резания и количества проходов (почти 18,46 %) и количество проходов (почти 15,47 %).

6. Скорость резания 344 об/мин, скорость подачи 0,25 мм/об и четыре прохода являются оптимальными параметрами для накатки роликом заготовок из сплава Al6061-T6, что позволяет

получить минимальную шероховатость поверхности 0,807 мкм, максимальную микротвердость 119,2 HV и минимальную погрешность круглости 4,282 мкм.

Список литературы

1. *El-Axir M.H.* An investigation into the ball burnishing of aluminum alloy 6061-T6 // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2007. – Vol. 221 (12). – P. 1733–1742. – DOI: 10.1243/09544054JEM818.

2. *Klocke F., Liermann J.* Roller burnishing of hard turned surfaces // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1998. – Vol. 38. – P. 419–423. – DOI: 10.1016/S0890-6955(97)00085-0.

3. *Murthy R.L., Kotiveerachari B.* Burnishing of metallic surfaces – a review // Precision Engineering. – 1981. – Vol. 3. – P. 172–179. – DOI: 10.1016/01416359(81)90010-6.

4. *Korzynski M.* Modeling and experimental validation of the force–surface roughness relation for smoothing burnishing with a spherical tool // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2007. – Vol. 47. – P. 1956–1964. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2007.03.002.

5. Characteristics of Rb40 steel superficial layer under the ball and roller burnishing / H. Hamadache, L. Laouar, N.E. Zeghib, K. Chaoui // Journal of Materials Processing Technology. – 2006. – Vol. 180 (1–3). – P. 130–136. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.05.013.

6. Investigation of the burnishing force during the burnishing process with a cylindrical surfaced tool / H. Luo, J. Liu, L. Wang, Q. Zhong // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2006. – Vol. 220. – P. 893–904. – DOI: 10.1243/09544054B07604.

7. *Ebeid S.J., Ei-Taweel T.A.* Surface improvement through hybridization of electrochemical turning and roller burnishing based on the Taguchi technique // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2005. – Vol. 219 (5). – P. 423–430. – DOI: 10.1243/095440505X3228.

8. The effect of burnishing parameters on burnishing force and surface microhardness / H. Luo, J. Liu, L. Wang, Q. Zhong // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2006. – Vol. 28. – P. 707–713. – DOI: 10.1007/s00170-004-2412-0.

9. 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.

10. *Sundararajan P.N., Nagarajan N.* Study of internal roller burnishing operation on En8 material // International Journal of Research and Innovation in Engineering Technology. – 2015. – Vol. 1 (12). – P. 10–12.

11. Experimental investigation of the effect of roller burnishing process parameters on surface roughness and surface hardness of C40E steel / N. Kumar, A. Sachdeva, L.P. Singh, H. Tripathi // International Journal of Machining and Machinability of Materials. – 2016. – Vol. 18. – P. 185–99. – DOI: 10.1504/IJMMM.2016.075470.

12. *Przybylski W.* Integrated production technology of cylindrical surfaces by turning and burnishing // Advances in Manufacturing Science and Technology. – 2016. – Vol. 40 (3). – DOI: 10.2478/amst-2016-0014.

13. *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.

14. Effect of roller burnishing process parameters on the surface roughness and microhardness for TA2 alloy / X.L. Yuan, Y.W. Sun, L.S. Gao, S.L. Jiang // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – Vol. 85. – P. 1373–1383. DOI: 10.1007/s00170-015-8031-0.

15. *Bourebia M., Laouar L.H., Dominiak S.* Improvement of surface finish by ball burnishing: approach by fractal dimension // Surface Engineering. – 2017. – Vol. 3. – P. 255–262. – DOI: 10.1080/02670844.2016.1232778.

16. *Luca L., Neagu-Ventzel S., Marinescu I.* Effects of working parameters on surface finish in ball-burnishing of hardened steels // Precision Engineering. – 2005. – Vol. 29. – P. 253–256. – DOI: 10.1016/j.precisioneng.2004.02.002.

17. *Cobanoglu T., Ozturk S.* Effect of burnishing parameters on the surface quality and hardness // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2015. – Vol. 229. – P. 286–294. – DOI: 10.1177/0954405414527962.

18. An investigation of the mechanics of roller burnishing through finite element simulation and experiments / P. Balland, L. Tabourot, F. Degre, V. Moreau // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2013. – Vol. 65. – P. 29–36. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2012.09.002.

19. 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.

20. *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.

21. *Chinchanikar 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.

22. *Gaikwad V.S., Chinchanikar 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. – DO I: 10.1080/2374068X.2021.1976554.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

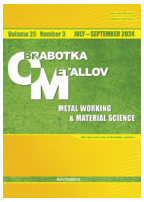
© 2024 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2024 vol. 26 no. 3 pp. 52–65
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.3-52-65

NSTU NETI

Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Modeling and optimization of roller burnishing of Al6061-T6 process for minimum surface roughness, better microhardness and roundness

Rashmi Dwivedi [1, a], ***Avinash Somatkar*** [1, 2, b], ***Satish Chinchanikar*** [2, c, *]

[1] Mechanical Engineering Department, Sri Satya Sai University of Technology & Medical Science, Sehore, Madhya Pradesh, 466001, India
[2] Department of Mechanical Engineering, Vishwakarma Institute of Information Technology, Pune, 411048, India

[a] https://orcid.org/0000-0002-9755-5330, rashmidwivedi29@gmail.com; [b] https://orcid.org/0000-0002-2885-2104, avinash.somatkar@viit.ac.in;
[c] https://orcid.org/0000-0002-4175-3098, satish.chinchanikar@viit.ac.in

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 09 June 2024
Revised: 17 June 2024
Accepted: 22 June 2024
Available online: 15 September 2024

Keywords:
Roller burnishing
Al6061-T6
Surface roughness
Microhardness
Roundness
Optimization

ABSTRACT

Introduction. Roller burnishing is one of the most common methods of improving the surface quality of parts, wear resistance, microhardness, and corrosion resistance. The process involves compressing and smoothing the workpiece using the pressure of a hardened roller. It is often used to improve part performance and lifespan in sectors including automotive, aerospace, and medical equipment manufacturing. The literature reviewed shows that the roller burnishing process effectively improves the overall surface quality and hardness of the workpiece. In addition, roller burnishing is considered as an affordable method to enhance the functionality and robustness of machined parts by reducing the likelihood of surface defects such as like scratches and cracks. However, very few studies have been reported on the modeling and optimization of roller burnishing of *Al6061-T6* for minimum surface roughness, better microhardness, and roundness. **The methods of investigation.** In the current work, roller burnishing of *Al6061-T6* is modeled and optimized for superior microhardness, roundness, and minimal surface roughness. Under dry-cutting conditions, the performance of roller burnishing of *Al6061* specimens is assessed in terms of process factors such as cutting speed, feed, and number of passes. Mathematical models to predict the surface roughness, microhardness, and deviation in roundness are developed based on the experimental results. **Results and Discussion.** The coefficient of correlation for the developed models is found to be close to 0.9, which indicates that it can be reliably used to predict and optimize the roller burnishing of the *Al6061-T6*. According to this study, the use of the following cutting parameters leads to the lowest variation in roundness (4.282 μm), the better microhardness (119.2 Hv), and the lowest surface roughness (0.802 μm): cutting speed 344 rpm, feed 0.25 mm/rpm and four passes. Further, the study reveals that increasing the number of passes (beyond four) does not significantly improve the surface roughness or microhardness. However, it does lead to a slight increase in the roundness deviation. Therefore, in order to achieve optimal results, it is recommended to use a maximum of four passes during roller burnishing of *Al6061* specimens under dry cutting conditions. These results imply that roller burnishing can effectively improve the overall quality and hardness of the workpiece surface. In addition, roller burnishing is considered as an affordable method to increase the functionality and robustness of machined parts by reducing the likelihood of surface defects like scratches and cracks.

For citation: Dwivedi R., Somatkar A., Chinchanikar 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. (In Russian).

References

1. El-Axir M.H. An investigation into the ball burnishing of aluminum alloy 6061-T6. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2007, vol. 221 (12), pp. 1733–1742. DOI: 10.1243/09544054JEM818.

2. Klocke F., Liermann J. Roller burnishing of hard turned surfaces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1998, vol. 38, pp. 419–423. DOI: 10.1016/S0890-6955(97)00085-0.

3. Murthy R.L., Kotiveerachari B. Burnishing of metallic surfaces – a review. *Precision Engineering*, 1981, vol. 3, pp. 172–179. DOI: 10.1016/01416359(81)90010-6.

4. Korzynski M. Modeling and experimental validation of the force–surface roughness relation for smoothing burnishing with a spherical tool. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, vol. 47, pp. 1956–1964. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2007.03.002.

*** Corresponding author**
Satish Chinchanikar, D.Sc. (Engineering), Professor
Vishwakarma Institute of Information Technology,
411048, Pune, India
Tel.: +91-2026950401, **e-mail:** satish.chinchanikar@viit.ac.in

5. Hamadache H., Laouar L., Zeghib N.E., Chaoui K. Characteristics of Rb40 steel superficial layer under the ball and roller burnishing. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, vol. 180 (1–3), pp. 130–136. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.05.013.

6. Luo H., Liu J., Wang L., Zhong Q. Investigation of the burnishing force during the burnishing process with a cylindrical surfaced tool. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2006, vol. 220, pp. 893–904. DOI: 10.1243/09544054B07604.

7. Ebeid S.J., Ei-Taweel T.A. Surface improvement through hybridization of electrochemical turning and roller burnishing based on the Taguchi technique. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2005, vol. 219 (5), pp. 423–430. DOI: 10.1243/095440505X3228.

8. Luo H., Liu J., Wang L., Zhong Q. The effect of burnishing parameters on burnishing force and surface microhardness. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, vol. 28, pp. 707–713. DOI: 10.1007/s00170-004-2412-0.

9. 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.

10. Sundararajan P.N., Nagarajan N. Study of internal roller burnishing operation on En8 material. *International Journal of Research and Innovation in Engineering Technology*, 2015, vol. 1 (12), pp. 10–12.

11. Kumar N., Sachdeva A., Singh L.P., Tripathi H. Experimental investigation of the effect of roller burnishing process parameters on surface roughness and surface hardness of C40E steel. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 2016, vol. 18, pp. 185–99. DOI: 10.1504/IJMMM.2016.075470.

12. Przybylski W. Integrated production technology of cylindrical surfaces by turning and burnishing. *Advances in Manufacturing Science and Technology*, 2016, vol. 40 (3). DOI: 10.2478/amst-2016-0014.

13. 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.

14. Yuan X.L., Sun Y.W., Gao L.S., Jiang S.L. Effect of roller burnishing process parameters on the surface roughness and microhardness for TA2 alloy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 85, pp. 1373–1383. DOI: 10.1007/s00170-015-8031-0.

15. Bourebia M., Laouar L.H., Dominiak S. Improvement of surface finish by ball burnishing: approach by fractal dimension. *Surface Engineering*, 2017, vol. 33, pp. 255–262. DOI: 10.1080/02670844.2016.1232778.

16. Luca L., Neagu-Ventzel S., Marinescu I. Effects of working parameters on surface finish in ball-burnishing of hardened steels. *Precision Engineering*, 2005, vol. 29, pp. 253–256. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2004.02.002.

17. Cobanoglu T., Ozturk S. Effect of burnishing parameters on the surface quality and hardness. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2015, vol. 229, pp. 286–294. DOI: 10.1177/0954405414527962.

18. Balland P., Tabourot L., Degre F., Moreau V. An investigation of the mechanics of roller burnishing through finite element simulation and experiments. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, vol. 65, pp. 29–36. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2012.09.002.

19. 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.

20. Chinchanikar 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).

21. Chinchanikar 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.

22. Gaikwad V.S., Chinchanikar 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).