
**НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
В МАШИНОСТРОЕНИИ**

УДК 621.9.011:669.15-194.56:539.25'32'536

**НОВЫЙ ПОДХОД ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ПРИМЕНЕНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ ПОДАЧИ
МИНИМАЛЬНОГО КОЛИЧЕСТВА СМАЗКИ**© 2021 г. А. П. Митрофанов^{1,*}, К. А. Паршева¹¹ Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО
“Волгоградский государственный технический университет”, Волжский, Россия

*e-mail: greenmap@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.07.2020 г.

Принята к публикации 22.10.2020 г.

Исследована возможность синтеза технологии подачи минимального количества смазочной среды в охлажденном воздухе (*SAMQL*) с системой очистки круга потоком воздуха (*WCS*) при шлифовании жаропрочного никелевого сплава. Результаты экспериментальных исследований показывают, что при использовании технологии *SAMQL+WCS* значительно снижаются составляющие силы резания, понижается температура контактного взаимодействия, улучшается качество обработанной поверхности за счет уменьшения параметров шероховатости и наличия следов адгезионного взаимодействия. Предлагаемая технология по совокупности своих функций может являться перспективной альтернативой при шлифовании с использованием традиционных смазочно-охлаждающих жидкостей.

Ключевые слова: минимальное количество смазки, охлажденный воздух, шлифование, соевое масло, очистка круга воздухом

DOI: 10.31857/S0235711921010132

В связи с развитием технологий и большому вниманию, уделяемому к проблемам защиты окружающей среды, в последнее время широко развивается научное направление по исследованию технологии подачи минимального количества смазки (*MQL*) на операциях металлообработки [1, 2], так как значимой проблемой, с точки зрения экологии, является использование в машиностроении смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ). Однако, в процессе абразивной обработки, где наблюдаются высокие контактные температуры, использование *MQL* в обычном ее представлении не всегда эффективно по сравнению с охлаждением СОЖ. В научном сообществе были предприняты некоторые шаги к повышению эффективности шлифования при использовании технологии *MQL*. Положительного эффекта добились авторы работ [3, 4], применяя дополнительное охлаждение зоны резания криогенными средами (жидкий азот, CO_2). Сложность конструкции подвода и хранения криогенных сред создают проблемы дальнейшего развития данного направления. В работах [5, 6] предложено охлаждать зону контактного взаимодействия с помощью вихревой трубы (на основе вихревого эффекта). Такой способ достаточно прост в реализации, но эффективность его без использования смазки не столь высока. В связи с этим, в работах [7–10] предлагается использовать технологию подачи минимального количества смазочной среды в охлажденном воздушном потоке (*SAMQL* – cold air with minimum quantity lubrication) с применением вихревой трубы. Еще одно интересное направление рассматрива-

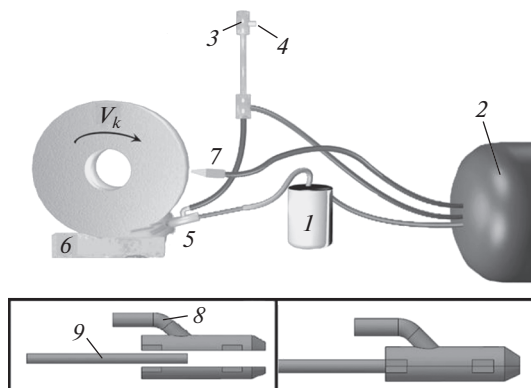


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – система подачи смазки *Spraymat 700*; 2 – компрессор; 3 – вихревая труба; 4 – выход горячего воздуха; 5 – сопло *SAMQL*; 6 – заготовка; 7 – сопло *WCJ*; 8 – подвод холодного воздуха; 9 – трубка подачи масла.

ется авторами в работах [11–14], где предложено использование системы очистки круга потоком воздуха (*WCJ*) совместно с *MQL*. Применение метода обработки *MQL + WCJ* показало себя более эффективным, чем традиционное *MQL*. Использование системы очистки круга потоком воздуха снизило забивание пор круга, что позволило приблизить результаты к традиционному методу охлаждения с помощью СОЖ [12]. В настоящей статье впервые в мировой практике предложено применить методы *SAMQL* и *WCJ* одновременно. Реализация данной технологии позволит осуществить все основные функции СОЖ: 1) смазывание – посредством использования минимального количества смазки; 2) охлаждение – обдувание зоны резания воздухом с отрицательными температурами; 3) очищение – обработка рабочей поверхности круга высокоскоростным потоком воздуха.

Цель работы – исследовать и доказать эффективность предлагаемой технологии *SAMQL + WCJ* путем анализа эксплуатационных показателей процесса шлифования жаропрочного никелевого сплава с использованием смазочной среды растительного происхождения.

Материалы и методы исследования. Для проведения экспериментальных исследований использовали плоскошлифовальный станок с ЧПУ *CHEVALIER* модель *Smart-V1224III*. Характеристика абразивного инструмента – 24AF60K7V5. Режим шлифования: скорость круга $v = 35$ м/с; скорость подачи стола $v_s = 6$ м/мин; подача на глубину $t = 0.01$ мм/ход. Величина припуска, удаляемого за один опыт – 0.5 мм, количество параллельных опытов – три. На основе анализа имеющихся работ по применению технологии подачи *MQL* и *SAMQL* в процессе шлифования [7, 8, 15, 16], выбран режим дозирования смазочной среды равный 50 мл/ч. Для подачи воздуха в систему воздушного охлаждения использовался компрессор *AIRRUSCE 250-V135*. В качестве смазочной среды предлагается использовать соевое растительное масло [9, 10], так как оно имеет минимальное отрицательное воздействие на окружающую среду.

Устройство подачи минимального количества смазки в охлажденном воздухе (*SAMQL*) реализовано посредством синтеза установки *MQL* (модель *Spraymat 700* производитель *Steidle* Германия) и вихревой трубы (рис. 1).

Величина потока охлажденного воздуха составляла $12 \text{ м}^3/\text{ч}$, при соответствующей температуре -5°C . Выбор величины потока основан на результатах исследований, представленных в работах [7, 8]. Используя возможности 3D-печати, было изготовле-

но сопло для реализации технологии *SAMQL*, в котором сопло подачи *MQL* располагается в центре наконечника с круглым сечением. Угол наклона сопла относительно обрабатываемой заготовки составляет 15° .

В рамках технологии *SAMQL* с использованием системы очистки круга сжатым потоком воздуха (*WCJ*) было дополнительно установлено сопло на расстоянии 1 мм с углом падения 30° от нормали поверхности круга. Давление воздуха в системе очистки составило 7.0×10^5 Па. Скорость потока воздуха на выходе из сопла 780 м/с.

В качестве обрабатываемого материала использовался жаропрочный сплав ХН45МВТЮБР (ЭП718), являющийся аналогом одного из самого востребованного в мире никелевого сплава Inconel718. Для экспериментальных исследований были подготовлены образцы размером $75 \times 35 \times 7$ мм, которые прошли термообработку по стандартной технологии, в результате чего их твердость составила 37 НРСэ.

В ходе исследований контролировали шероховатость обработанной поверхности по параметру R_a , измерения проводили профилографом-профилометром *Mitutoyo SurfTest SJ-410* не менее чем в 10 сечениях.

Составляющие силы резания измеряли с использованием шестикомпонентного силоизмерительного комплекса *Amti MC36-1000*, аналогово-цифрового преобразователя *L-CARD E14-140* и ноутбука со специальным программным обеспечением *Powergraph*.

Исследование морфологии поверхности обработанных образцов проведены с применением двухлучевого электронного растрового микроскопа *Versa 3D LoVac* при ускоряющем напряжении $U = 20$ кВ.

Для измерения температуры в зоне контактного взаимодействия используется полусинтетическая перерезаемая термопара. Основным термоэлектродом служит проволока из сплава константан. Вторым термоэлектродом термопары является сама заготовка (образец). Запись сигнала осуществляется с помощью усилителя, АЦП *L-CARD E14-140* и программного обеспечения *LGraph*. Фиксируемая температура представляет собой температуру поверхности заготовки после контактного взаимодействия с абразивным кругом.

Рабочая поверхность круга фотографировалась после проведения эксперимента с помощью USB цифрового микроскопа при стократном увеличении.

Результаты исследований и их обсуждение. Процессы, проходящие в зоне контактного взаимодействия при шлифовании, отражаются и на рабочей поверхности абразивного круга. Анализируя поверхность круга после шлифования без СОЖ (рис. 2а), можно выделить, как и наличие крупной пластичной стружки, так и достаточное количество фрагментированной небольшой по размеру. Совершенно иная картина наблюдается при шлифовании с микродозированной подачей смазки. Здесь значительно меняется характер стружкообразования. Образуется большое количество мелкой продолговатой стружки, которая вместе с остатками масла остается в порах круга. На поверхности после шлифования с использованием только технологии *MQL* (рис. 2б) имеются участки с налипшим металлом, но размер их существенно меньше, чем величина стружки при “сухом” шлифовании.

Применение технологии *SAMQL* (рис. 2в) способствует очищению рабочей поверхности круга. Здесь гораздо меньше следов налипания обрабатываемого металла. При использовании очищающей воздушной струи количество стружки, оставшейся после шлифования в порах круга, значительно уменьшилось (рис. 2г), что говорит о результативности исследуемой технологии *SAMQL + WCJ*.

Оценка составляющих силы резания показала, что при шлифовании с технологией *MQL* силовая нагрузка несколько выше, чем при обработке без СОЖ (табл. 1).

Здесь очевидно сказывается засаливание рабочей поверхности круга и, следовательно, высокая степень адгезии и трения. При использовании технологии *SAMQL* можно наблюдать некоторое снижение составляющих сил резания, вероятнее всего, за счет лучшего смазывающего и охлаждающего эффекта. Самое значительное умень-

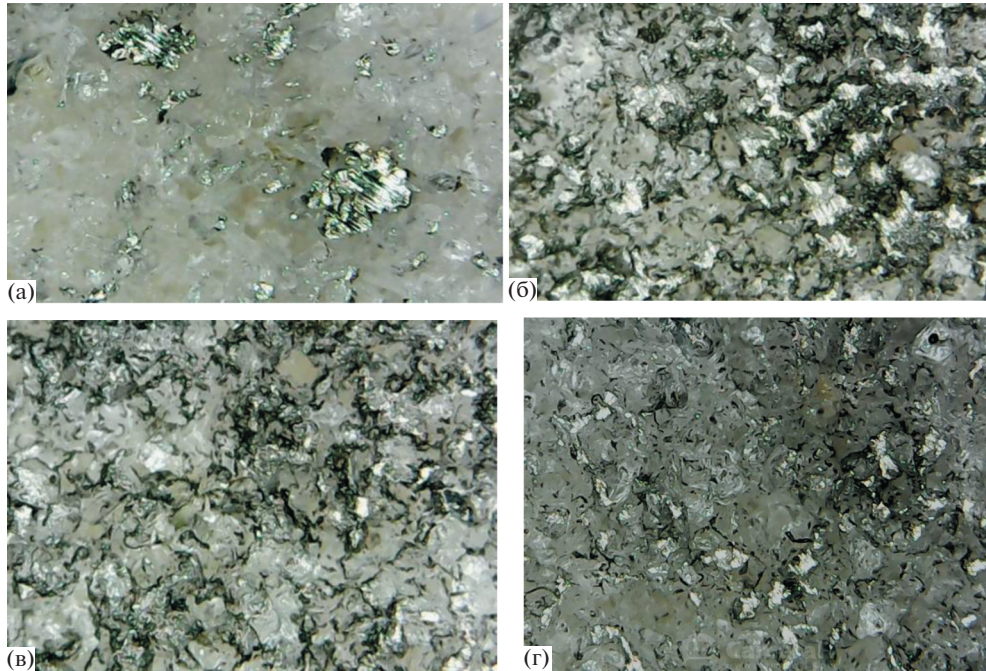


Рис. 2. СЭМ-фотографии рабочей поверхности круга: (а) – без СОЖ; (б) – *MQL*; (в) – *CAMQL*; (г) – *CAMQL + WCS*.

шение составляющих силы резания наблюдается при дополнительном использовании системы *WCS* по сравнению со всеми рассматриваемыми в настоящей статье технологиями, причем наиболее ярко это отражается на составляющей P_y . Благодаря эффективному разрушению воздушного барьера, который образуется при вращении шлифовального круга, и очистки рабочей поверхности потоком воздуха, в итоге позволило создать лучшие условия для проникновения смазочной среды на поверхность образца и рабочую поверхность круга, и как следствие, трение между зернами круга, образцом и стружкой уменьшается, способствуя снижению нагрузки при контактом взаимодействии.

Шероховатость обработанной поверхности после шлифования с применением *MQL* уменьшается в среднем в 1.5 раза, относительно значений, полученных без использования СОЖ (табл. 1). Разница в значениях при использовании технологии *MQL*

Таблица 1. Влияние условий обработки, на полученные значения составляющих силы резания (P_z, P_y), шероховатости обработанной поверхности (R_a) и температуру (T) при шлифовании

Параметры	Вид обработки			
	“Сухое”	<i>MQL</i>	<i>CAMQL</i>	<i>CAMQL + WCS</i>
P_z , Н/мм	2.9 ± 0.1	2.9 ± 0.1	2.7 ± 0.1	2.1 ± 0.1
P_y , Н/мм	9.7 ± 0.3	10.4 ± 0.4	8.2 ± 0.3	6.9 ± 0.2
R_a , мкм	1.1 ± 0.1	0.76 ± 0.04	0.69 ± 0.03	0.59 ± 0.03
T , °C	303 ± 15	260 ± 9	223 ± 7	185 ± 8

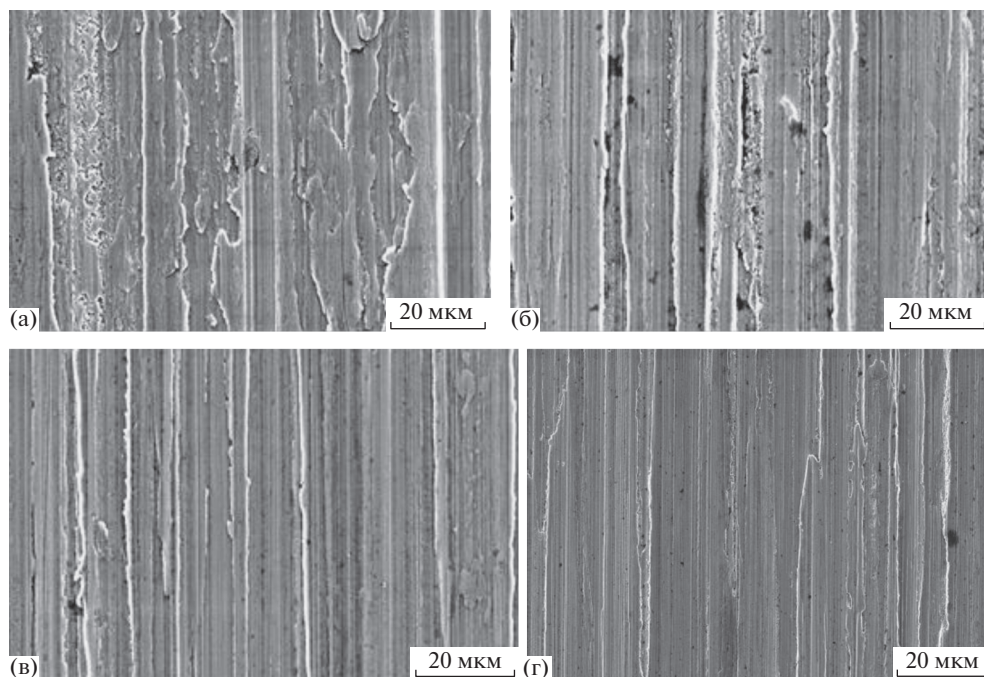


Рис. 3. СЭМ-фотографии обработанной поверхности: (а) – без СОЖ; (б) – *MQL*; (в) – *SAMQL*; (г) – *SAMQL + WCS*.

и *SAMQL* не столь существенна. Однако результаты, полученные при совместном применении *SAMQL + WCS* более значимы, так значение шероховатости поверхности снижается на 22 и 15% относительно показателей, имеющих с *MQL* и *SAMQL* соответственно. Несомненно, превалирующим фактором столь значительного эффекта является более качественная (очищенная от стружки) рабочая поверхность круга.

Очень важным показателем, характеризующим качество процесса шлифования, является температура контактного взаимодействия, тем более низкая теплопроводность обрабатываемого материала способствует ее высоким значениям. Основная цель предлагаемых решений для повышения эффективности технологии *MQL* заключается в как можно большем снижении абсолютных значений данного параметра. Анализ результатов исследования по оценке температуры при шлифовании показал, что при использовании технологии *SAMQL + WCS* значительно уменьшается температура в зоне резания относительно других видов обработки (табл. 1), что говорит о целесообразности предлагаемой технологии. Так, относительно процесса шлифования без СОЖ, температура поверхности снизилась практически на 40%. Данные по температуре, коррелируют с результатами, полученными при исследовании составляющих силы резания.

Характеристики свойств поверхностного слоя обрабатываемого материала зависят от множества факторов. Существенное влияние оказывают механические и физико-химические превращения, сопровождающие процесс абразивной обработки. При шлифовании без СОЖ состояние обработанной поверхности свидетельствует о значительном адгезионном взаимодействии абразивного инструмента с металлом (рис. 3а). Применение технологии *MQL* заметно улучшает состояние обработанной поверхности (рис. 3б), однако, и здесь имеются в наличии следы адгезионного взаимо-

действия. Более качественная и однородная поверхность получена после шлифования с технологией *SAMQL* (рис. 3в). При использовании предложенной технологии *SAMQL+WCSJ* (рис. 3г) качество поверхности разительно отличается от всех предыдущих способов обработки. На поверхности практически отсутствуют следы адгезионного взаимодействия, пластическая деформация минимальна. Данный эффект наблюдается за счет значительного снижения количества частиц, прилипших к поверхности круга (рис. 2г).

Выводы. 1. Эксплуатационные испытания показали, что при использовании технологии *SAMQL* совместно с системой очистки круга потоком воздуха (*WCSJ*), шероховатость обработанной поверхности снижается на 22 и 15%, составляющая силы резания P_y уменьшается на 30 и 15% относительно показателей, имеющих при шлифовании с *MQL* и *SAMQL* соответственно. **2.** Установлено, что рабочая поверхность абразивного инструмента при использовании технологии *SAMQL + WCSJ* в наименьшей степени подвергается налипанию стружки и ее количество в порах незначительно, что способствует более благоприятному с точки зрения резания и трения процессу шлифования. **3.** Доказана эффективность технологии *SAMQL + WCSJ* для снижения температуры контактного взаимодействия; относительно шлифования без СОЖ температура поверхности уменьшается практически на 40%. **4.** При использовании технологии микродозированной подачи смазочной среды наблюдается уменьшение следов адгезионного взаимодействия на обработанной поверхности. Наилучшие результаты получены при шлифовании с технологией *SAMQL + WCSJ*. **5.** Полученные положительные эффекты от использования технологии *SAMQL + WCSJ* при шлифовании жаропрочного сплава ХН45МВТЮБР (ЭП718), позволяют говорить о целесообразности и перспективности замены традиционных СОЖ данной технологией, и необходимости дальнейших исследований в этом направлении.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sen B., Mia M., Krolczyk G.M. et al.* Eco-Friendly Cutting Fluids in Minimum Quantity Lubrication Assisted Machining: A Review on the Perception of Sustainable Manufacturing//International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. 2019. <https://doi.org/10.1007/s40684-019-00158-6>
2. *Wickramasinghe K.C., Hiroyuki Sasahara, Erween Abd Rahim, Perera G.I.P.* Green Metalworking Fluids for sustainable machining applications: A review // Journal of Cleaner Production. 2020. V. 257. № 120552. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120552>
3. *García E., Méresse D., Pombo I., Dubar M., Sánchez J.* Role off rozen lubricantfilmon tribological behaviour and wear mechanisms in grinding // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016. V. 82. P. 1017. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7397-3>
4. *Reddy P.P., Ghosh A.* Some critical issues in cryo-grinding by a vitrified bonded alumina wheel using liquid nitrogen jet // Journal of Materials Processing Technology . 2016. V. 229. P. 329. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.09.040>
5. *Nguyen T.* An assessment of the applicability of cold air and oil mist in surface grinding // Journal of Materials Processing Technology. 2003. V. 140. P. 224. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00714-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00714-3)
6. *Choi H.Z., Lee S.W., Jeong H.D.* The cooling effects of compressed cold air in cylindrical grinding with alumina and CBN wheels // Journal of Materials Processing Technology. 2002. V. 127. P. 155. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00117-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00117-6)

7. *Saberi A., Parsa H., Ashrafijou M., Rabiei F.* Improvement of surface grinding process performance of CK45 soft steel by minimum quantity lubrication (MQL) technique using compressed cold air jet from vortex tube // *Journal of Cleaner Production*. 2016. V. 131. P. 728.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.104>
8. *Zhang J., Li C., Zhang Y., Yang M., Jia D., Hou Y., Li R.* Temperature field model and experimental verification on cryogenic air nanofluid minimum quantity lubrication grinding // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. V. 97. P. 209.
<https://doi.org/10.1007/s00170-018-1936-7>
9. *Крутикова А.А., Митрофанов А.П., Паршева К.А.* Применение технологии подачи минимального количества смазки в охлажденном воздушном потоке при шлифовании жаропрочного сплава // *Технология металлов*. 2019. № 8. С. 9.
<https://doi.org/10.31044/1684-2499-2019-8-0-9-15>
10. *Митрофанов А.П., Носенко В.А.* Исследование технологии микродозированной подачи смазочных композиций с наночастицами при шлифовании жаропрочного никелевого сплава с дополнительным воздушным охлаждением // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2019. Т. 21. № 4. С. 6.
<https://doi.org/10.17212/1994-6309-2019-21.4-6-18>
11. *Lopes J.C., Garcia M.V., Volpato R.S. et al.* Application of MQL technique using TiO₂ nanoparticles compared to MQL simultaneous to the grinding wheel cleaning jet // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. V. 106. P. 2205.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00170-019-04760-5>
12. *Eduardo Carlos Bianchi* Evaluating the effect of the compressed air wheel cleaning in grinding the AISI 4340 steel with CBN and MQL with water // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. V. 95. P. 2855.
<https://doi.org/10.1007/s00170-017-1433-4>
13. *Rodriguez R.L., Lopes J.C., Hildebrandt R.A.* Evaluation of grinding process using simultaneously MQL technique and cleaning jet on grinding wheel surface // *Journal of Materials Processing Technology*. 2019. V. 271. P. 357.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.03.019>
14. *Lopes J.C.* Application of a wheel cleaning system during grinding of alumina with minimum quantity lubrication // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. V. 102. P. 333.
<https://doi.org/10.1007/s00170-018-3174-4>
15. *Lee P.A.* Study on Thermal Characteristics of Micro-Scale Grinding Process Using Nanofluid Minimum Quantity Lubrication (MQL) // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2015. V. 16. № 9. P. 1899.
<https://doi.org/10.1007/s12541-015-0247-2>
16. *Mao C., Tang X., Zou H., Zhou Z., Yin W.* Experimental investigation of surface quality for minimum quantity oil-water lubrication grinding // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012. V. 59. № 1–4. P. 93.
<https://doi.org/10.1007/s00170-011-3491-3>