

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ

Зеленогурский университет

Зелена Гура, Польша

В настоящее время все больше деталей машин изготавливается из труднообрабатываемых сталей и сплавов, керамики, композитов и других новых конструкционных материалов. Многие детали имеют очень сложную форму, минимальные припуски на обработку, высокие требования к качеству обработанных поверхностей. Для обеспечения рациональных условий обработки таких деталей необходим комплексный подход, объединяющий знания о процессах обработки материалов резанием, свойствах материалов, оборудовании и т.д. Баланс между всеми факторами, влияющими на процесс, определяет выбор технологии обработки, а значит ее стоимость, экологию и ряд других показателей (рис. 1).

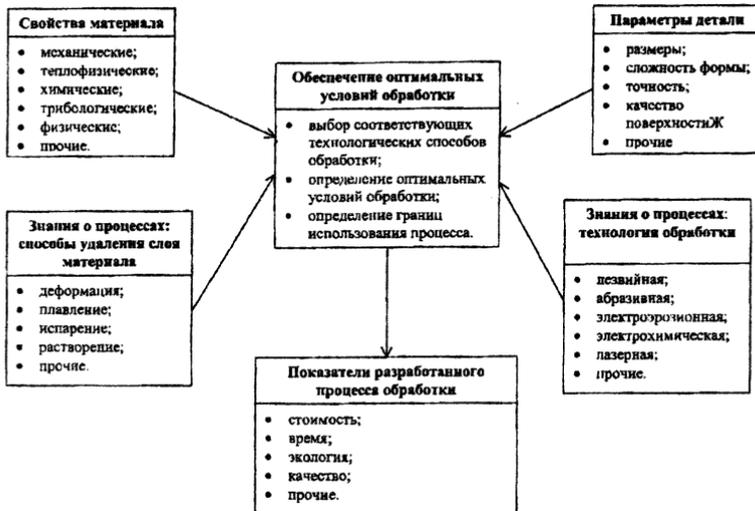


Рис. 1. Факторы, определяющие выбор технологии обработки детали

Совершенствование различных технологических процессов обработки резанием обусловлено целым рядом факторов:

1) возрастанием требований к точности обработки и качеству обработанной поверхности. Использование новых технологий обработки поверхности инструмента обеспечивает идеальную остроту режущих кромок, в первую очередь алмазных инструментов, что позволяет заменить полирование и притирку на резание. Такая обработка относится к так называемым нанотехнологиям и получила название сверхточной [1];

2) повышением скорости резания до максимально допустимого уровня с точки зрения безопасности работы станка. Такой процесс получил название „*high speed cutting (HSC)*” и сопровождается целым рядом изменений в физических процессах, происходящих в зоне резания. Более подробно закономерности сверхскоростной обработки рассмотрены в [2];

3) ограничением использования СОЖ. Затраты на использование и последующую утилизацию СОЖ в современном производстве в несколько раз превышают затраты на режущие инструменты [3]. Кроме того, они отрицательно влияют на состояние здоровья человека и окружающую среду. В связи с этим все более широкое распространение получает резание без использования либо с минимальным использованием СОЖ;

4) использованием лезвийной обработки высокотвердых или закаленных материалов вместо шлифования [4]. Такие технологии находят все более широкое применение благодаря расширенному использованию сменных пластин из сверхтвердых материалов и режущей керамики. Современные пластины из СТМ и керамики имеют размеры, полностью соответствующие размерам пластин из твердых сплавов, а значит, не требуют специальных оправок, способов крепления и т.д. Данный способ обработки существенно улучшает экологический аспект производства. Например, при лезвийной обработке 5000 шестерен образуется около 50 кг стружки, которую в чистом и сухом виде легко подвергнуть переработке. Однако при шлифовании такой партии деталей необходимо дополнительно иметь до 8 т СОЖ, а в дальнейшем обеспечить утилизацию 20 л шлама [5], что требует весьма значительных затрат.

Анализ возможностей использования того или иного технологического способа для обработки конкретной детали основывается в первую очередь на оценке обрабатываемости ее материала с учетом требований по обеспечению точности, качества обработки и т.д. Известно, что для каждого способа обработки существуют границы, за которыми его использование не целесообразно. Расширить эти границы можно:

1) изменяя свойства обрабатываемого материала в зоне реализации процесса обработки;

2) изменяя характер физико-химических процессов в зоне обработки.

Определяющим условием расширения традиционных границ обработки является введение в зону обработки дополнительной энергии. Эта энергия либо поступает извне, либо остается после предыдущих технологических операций (табл. 1).

Таблица 1

Способы обработки с вводом дополнительной энергии в зону обработки

Исходный вид энергии	Дополнительный вид энергии			
	Механическая	Гравитационная	Тепловая	Химическая
Механическая	Резание с наложением ультразвуковых колебаний	Сверхскоростная обработка	Резание с подогревом	Шлифование с электрохимической правкой круга
Тепловая	Электроэрозионная обработка с наложением ультразвуковых колебаний			Лазерная обработка со сжиганием и последующим выдуванием материала
Химическая	Электрохимическое шлифование		Объединение электрохимической и электроэрозионной обработок	

Использование комбинаций различных видов энергии не только обеспечивает эффективное решение современных технологических проблем, но и вызывает существенные изменения в характере физико-химических процессов, имеющих место в зоне обработки. Некоторые из перспективных технологических процессов обработки резанием рассмотрим более подробно.

Резание с наложением дополнительных колебаний. Процесс вибрационного резания заключается в том, что на обычно принятую на данной операции кинематическую схему обработки накладывается дополнительное вибрационное движение инструмента или заготовки. Общие физические особенности этого процесса [6]:

кратковременное периодическое изменение мгновенных скоростей и углов резания:

$$v_s = v_0 \pm \Delta v_s = v_0 \pm 60A\omega/1000 = v_0 \pm 0,12\pi fA;$$

$$\alpha_s = \alpha_0 - \Delta\alpha_1 - \Delta\alpha_s \cos\omega t;$$

$$\gamma_s = \gamma_0 + \Delta\gamma_1 + \Delta\gamma_s \cos\omega t,$$

где ω – круговая частота вибраций; f – частота вибраций; A – амплитуда вибраций; α_0 , γ_0 – углы заточки инструмента; $\Delta\alpha_1$, $\Delta\gamma_1$ – кинематические изменения углов α_0 и γ_0 в

результате движения подачи; $\Delta\alpha_{\text{в}}$, $\Delta\gamma_{\text{в}}$ – амплитуды изменения углов при наложении вибраций; τ — время;

переменные циклические нагрузки на обрабатываемый материал, обусловленные переменными скоростями и углами резания;

снижение коэффициентов и сил трения на площадках контакта инструмента со стружкой и обрабатываемой деталью;

повышенная эффективность применения СОТС в результате их лучшего проникновения на контактные площадки и надежного смывания режущего клина при выходе инструмента из контакта с обрабатываемым материалом.

Отмеченные особенности резания улучшают условия работы инструмента. В результате действия принудительных колебаний снижается уровень сил и температур резания. Процесс резания превращается из непрерывного в прерывистый. При этом изменяются условия стружкообразования, а режущие кромки получают возможность периодического отдыха вследствие кратковременного уменьшения или снятия нагрузок. Отпадает также необходимость в стружколомающих уступах и лунках, ослабляющих режущее лезвие. Действие этих положительных факторов при оптимальных условиях обработки превалирует над отрицательными, среди которых следует отметить переменную нагрузку на режущие лезвия, возрастание высоты микронеровностей обработанной поверхности и снижение долговечности некоторых узлов станка.

В общем случае на обычные движения при механической обработке могут накладываться осевые, радиальные и тангенциальные колебания, а также колебания, действующие в любом другом направлении. Практические результаты от наложения дополнительных колебаний сводятся к обеспечению гарантированного стружкодробления или к улучшению обрабатываемости материала. В первом случае достаточно иметь частоту вынужденных колебаний не свыше 50 Гц. Это достигается при использовании механических, пневматических или гидравлических вибраторов [6] либо модулированием подачи на станках с ЧПУ [7]. Во втором случае необходимо использование высокочастотных колебаний, генерируемых пьезоэлектрическими, магнито-стрикционными, электрогидравлическими и другими вибраторами [6, 8].

Резание с наложением ультразвуковых колебаний хорошо зарекомендовало себя при обработке такого перспективного материала, как керамика. Так, при точении стеклокерамики колебания реза с частотой 20 кГц и амплитудой до 10 мкм вызывают интенсивное образование микротрещин непосредственно перед режущим лезвием, что существенно снижает прочность обрабатываемого материала. Как следствие, наблюдается снижение силы резания до 50 % при одновременном повышении стойкости реза до 20 раз по сравнению с традиционным резанием [9].

Аналогичные результаты наблюдаются при сверлении керамики. Имеет место раздробление стружки, значительное снижение сил сверления, отсутствие или резкое сокращение образования микротрещин и иных поверхностных дефектов [10]. При

этом более эффективно одновременное наложение колебаний как на инструмент, так и на обрабатываемую деталь [11].

Резание с подогревом. Одним из путей интенсификации процессов резания является искусственный подогрев до определенной температуры срезаемого слоя заготовки. Принципиальная идея обработки с подогревом заключается в использовании температурного закона сопротивления материала пластической деформации:

$$M_1 = M_2 e^{-\alpha(\theta_2 - \theta_1)},$$

где M_1, M_2 – механическая характеристика обрабатываемого материала, определяющая его сопротивление пластической деформации при меньшей θ_1 и большей θ_2 температурах; α – коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала и условий деформирования.

Согласно этому закону, нагрев во всех случаях снижает сопротивление металла пластической деформации, что широко используется при обработке металлов давлением. Аналогичный эффект нагрев обеспечивает и при обработке резанием. В частности, при обработке легированных и высокопрочных сталей отмечается снижение уровня сил и мощности резания на 30...70 % и увеличение периода стойкости инструмента в 4 – 40 раз; в ряде случаев элементная стружка переходит в сливную [6].

При резании с подогревом необходимо учитывать, что температура контактирующих слоев инструментального и обрабатываемого материалов складывается из температуры нагрева θ_n и температуры резания θ_p , обусловленной выделением теплоты в процессе резания: $\theta_z = \theta_n + \theta_p$. Поэтому θ_n необходимо подбирать с учетом скорости резания таким образом, чтобы θ_z обеспечивала минимальную интенсивность изнашивания режущего инструмента. В частности, при резании твердосплавным инструментом уровень температур влияет на интенсивность адгезионного и диффузионного изнашивания. Значение θ_z определяется по минимуму кривой суммарной интенсивности изнашивания, т. е. по максимуму зависимости $T - \theta_z$.

Резание с подогревом дает положительный эффект только в тех случаях, когда разупрочнение обрабатываемого материала превалирует над разупрочнением рабочих поверхностей инструмента. Во всех случаях при выборе температуры нагрева не следует достигать температур, вызывающих структурные превращения в обрабатываемом материале.

В последние годы широкое распространение получают плазменный и лазерный нагрев материала. Их преимуществом является возможность согласованного воздействия устройства для нагрева и режущего инструмента на материал срезаемого слоя. В частности, можно строго регулировать глубину нагрева, сохраняя температуру подповерхностных слоев значительно ниже температуры начала структурных превращений [12].

Плазменный нагрев осуществляется горелкой, в которой происходит ионизация вихревого потока сжатого рабочего газа, например, смеси водорода с аргоном, под действием электрического поля и высокой температуры при возникновении электрической дуги между вольфрамовым катодом и соплом горелки (анодом). В зависимости от температуры плазмы, диаметра ее струи и расстояния горелки от нагреваемой поверхности можно обеспечить прогрев поверхностного слоя детали на определенную глубину.

Аналогичным образом осуществляется резание с лазерным подогревом. Высокая плотность энергии лазерного излучения, простота регулирования температуры, площади нагрева и глубины проникания теплового излучения, небольшие мощности твердотельных лазеров сделали их использование наиболее перспективным из всех видов подогрева. Весьма эффективна такая технология при обработке жаропрочных сплавов и конструкционной керамики, например, Si_3N_4 . Такая керамика теряет свои прочностные свойства при температурах около 1000°C , что позволяет обрабатывать ее алмазными резцами, обеспечивая шероховатость обработанной поверхности $Ra < 0,3$ мкм и стойкость реза до 3 ч. В настоящее время лазер не является отдельным устройством, а встраивается непосредственно в металлорежущий станок с ЧПУ и работает в соответствии с управляющей программой.

Нагрев керамики при обработке изменяет соотношение между главной и радиальной силами резания. Если при обычном резании сила P_1 превышает P_2 , то при резании с подогревом это соотношение изменяется на противоположное, т.е. становится аналогичным случаю обработки пластичных материалов, дающих сливную стружку.

При фрезеровании труднообрабатываемых материалов с лазерным подогревом силы резания снижаются более, чем в 2 раза, износ фрезы меньше в 2 раза, производительность увеличивается в 3 раза.

Весьма положительно влияет подогрев керамики в ходе ее обработки на интенсивность изнашивания режущих лезвий инструментов [13]. Шероховатость обработанной поверхности при резании с подогревом уменьшается в 5 и более раз.

Резание без СОЖ. Смазочно-охлаждающие жидкости в последние годы все чаще рассматриваются как нежелательный фактор в производстве. Это обусловлено экономическими и экологическими причинами, в том числе все более жестким международным законодательством об охране окружающей среды [5, 14].

Согласно имеющимся данным [3, 5, 14], в крупносерийном производстве (автомобильная промышленность) на долю действий, связанных с применением СОЖ (доставка, использование, регенерация и т.д.) приходится от 7,5 до 17% общих производственных затрат, тогда как расходы на инструмент составляют только 4%. Весьма значительны затраты на последующую утилизацию и регенерацию СОЖ. В частно-

сти, в Германии в 1994 г. на утилизацию отправлялось свыше 750000 т СОЖ при затратах до 1500 марок на утилизацию 1 тонны, причем затраты эти непрерывно растут.

Важную роль играют также экологические последствия от использования СОЖ. С одной стороны, учитывается их отрицательное влияние на окружающую среду, с другой – вредное воздействие на здоровье работников. В результате применения СОЖ возрастает угроза кожных (до 30% всех профессиональных заболеваний [5]), аллергических и онкологических заболеваний, вызванных контактом организма человека с канцерогенными веществами – ароматическими углеводородами, оксидами и мылами металлов, продуктами бактерицидного разложения и т.д.

Известно, что резание всухую приводит к повышению температуры, и как следствие, к ускоренному износу инструмента, возрастанию термических напряжений в детали, ее тепловым деформациям и прочим отрицательным последствиям. Эти воздействия можно уменьшить следующим образом (рис. 2):

- выбирая технологию обработки, не требующую использования СОЖ;

- изменяя конструкцию и геометрию инструмента (размеры поверхностей, контактирующих с деталью и стружкой);

- используя износостойкие покрытия, препятствующие поступлению теплоты в инструмент;

- подбирая марки инструментальных материалов с повышенной теплостойкостью и теплопроводностью;

- используя твердые, газообразные смазочные вещества либо СОЖ с минимальным расходом (менее 100 мл/ч) в распыленном состоянии.

Применение СОЖ в таких малых количествах не требует значительных затрат на ее очистку и утилизацию, но в то же время обеспечивает снижение коэффициентов трения и адгезии на контактных площадках. Удаление мелкой стружки и пыли из зоны резания можно осуществлять с помощью сжатого воздуха. При этом нагретая стружка не накапливается в поддоне и не передает свою теплоту в металлорежущий станок, не остается на зажимных элементах приспособления, не вызывает ускоренного износа направляющих станка.

Основная проблема при резании всухую – правильный выбор инструментального материала с учетом специфики процесса обработки. Например, при обработке сталей главной проблемой является высокая температура резания, при обработке чугуна и силуминов – интенсивное абразивное изнашивание инструмента, при обработке алюминия – склонность стружки к схватыванию с инструментом и деталью. Различия между резанием всухую и с использованием СОЖ зависят также от вида обработки (рис. 3). Легко заметить, что максимальный эффект от сухой обработки

наблюдается при фрезеровании, поскольку прерывистое резание способствует охлаждению лезвий фрезы.

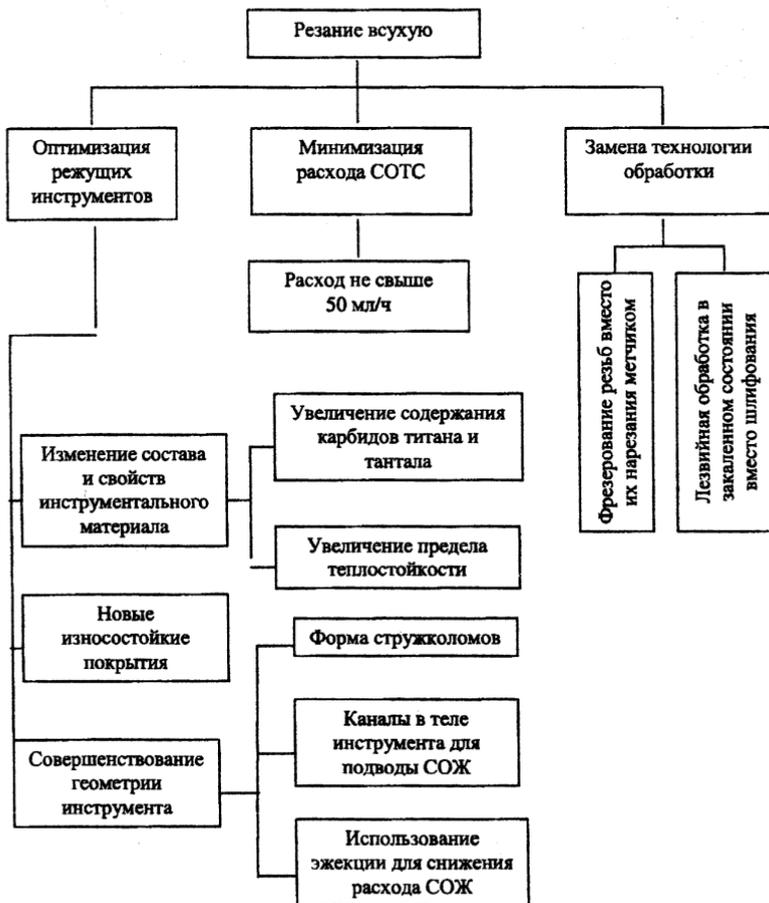


Рис. 2. Средства, позволяющие осуществлять резание без использования либо с минимальным использованием СОЖ

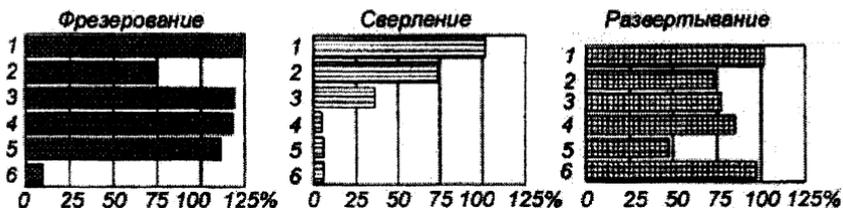


Рис. 3: Изменения стойкости инструментов при резании всухую и с использованием СОЖ (уровень стойкости 100%): 1 – серый чугун; 2 – сфероидальный чугун; 3 – сталь с $\sigma_s < 900$ МПа; 4 – сталь с $\sigma_s > 900$ МПа; 5 – нержавеющей стали; 6 – алюминий [5]

Режущие инструменты при сухой обработке должны обеспечивать приемлемые условия резания и иметь высокую стойкость. Учитывая, что прочность и износостойкость инструментальных материалов снижаются по мере роста температуры, для обработки рекомендуется использовать в первую очередь твердые сплавы и минералокерамику. Если невозможно исключить использование инструментов из быстрорежущей стали, следует наносить на них покрытия типа TiAlN. Снижение адгезии и сил трения между инструментом и стружкой возможно при нанесении на инструмент алмазных либо алмазоподобных пленок. Эффективность использования различных покрытий при фрезеровании всухую и с использованием СОЖ показана на рис. 4.

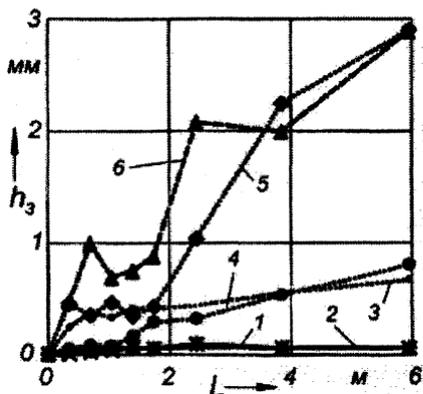


Рис. 4. Влияние покрытия на износ концевых фрез при обработке силумина AlZnMgCu 1,5

($v = 1000$ м/мин; $S_z = 0,07$ мм; $t = 6$ мм): 1 – покрытие отсутствует; 2 – аморфное покрытие типа С:Н; 3 – покрытие WC; 4 – алмазное покрытие; 5 – с расходом СОЖ 10 мл/ч; 6 – с расходом СОЖ 40 мл/ч [5]

При сверлении обработка всухую и с использованием сжатого воздуха показывают худшие результаты, чем с использованием СОЖ, однако резание с распыленной СОЖ может также обеспечить хорошие результаты. Здесь, однако, многое зависит от состава технологической среды (рис. 5).

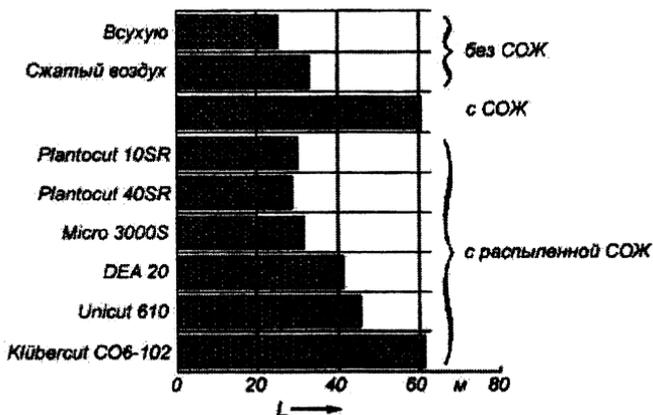


Рис. 5. Влияние условий охлаждения на путь резания при сверлении серого чугуна типа СЧ25 сверлами из твердого сплава К20 с покрытием TiN ($v = 120$ м/мин; $S = 0,3$ мм/об; диаметр сверла 10 мм) [5]

ЛИТЕРАТУРА

1. Ikawa N., Donaldson R.R., Komanduri R et al. Ultraprecision metal cutting – the past, the present and the future// Annals of CIRP. – 1991. – Vol. 40. – № 2. – P. 587 – 594.
2. Фельдштейн Е.Э. Основные закономерности сверхскоростного резания// Машиностроение. – 2002. – Вып. 18. – С. 73 – 79.
3. Cselle T., Barimani A. Today's applications and future developments of coatings for drill and rotating cutting tools// Surface & Coating Technology. – 1995. – Vol. 76 – 77. – P. 712 – 718.
4. Tonshoff H.K., Arendt C., Ben Amor R. Cutting of hardened steel// Annals of CIRP. – 2000. – Vol. 49. – № 2. – P. 547 – 565.
5. Schulz H. Hochgeschwindigkeitsbearbeitung. High-Speed Machining. Мюнхен – Wien: Carl Hanser Verlag, 1996. – 286 s.
6. Подураев В. Н. Резание труднообрабатываемых материалов. – М. 1974.
7. Каштальян И. А. Разработка и исследование методов повышения производительности и точности обработки на токарных станках с ЧПУ

лированием подачи: Дис. ... канд. техн. наук. – Мн., 1982. – 232 с. 8. Подураев В. Н. Обработка резанием с вибрациями. – М., 1970. 9. Weber H., Herberger I., Pilz R. Turning of machinable glass ceramics with an ultrasonically vibrated tool// Annals of CIRP. – 1984. – Vol. 33. – № 1. – P. 85 – 87. 10. Tsutsumi C., Okano K., Suto T. High-quality machining of ceramics// J. Mater. Process. Technol. – 1993. Vol. 37. – № 1/4. – P. 639 – 654. 11. Kumabe J., Fuchizawa K., Soutome T., Nishimoto Y. Ultrasonic superposition vibration cutting of ceramics// Prec. Engineering. – 1989. – Vol. 11. – № 2. – P. 71 – 77. 12. Подураев В. Н. Технология физико-химических методов обработки. – М., 1985. 13. Kitagawa T., Maekawa K. Plasma hot machining for new engineering materials// Wear. – 1990. – Vol. 139. – № 1. – P. 251 – 267. 14. Howes T.D., Gunshoff H.K., Heuer W. Environmental Aspects of Grinding Fluids// Annals CIRP. – 1991. – vol. 40/2. P. 623 – 630.

Рецензент — проф. Кочергин А. И.