

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Постановка проблемы. Общеизвестно, что процессы абразивной обработки характеризуются более высокой энергоемкостью обработки по сравнению с резанием лезвийным инструментом [1]. Это приводит к появлению различных дефектов на обрабатываемых поверхностях и снижению показателей качества и производительности обработки [2]. Чтобы повысить эффективность абразивной обработки, важно знать в первую очередь технологические закономерности изменения энергоемкости обработки, как основного параметра силовой напряженности процесса. В особой мере это относится к абразивной обработке деталей из цветных металлов, которые в силу высокой пластичности плохо обрабатываются резанием. Поэтому изыскание путей повышения эффективности их абразивной обработки является актуальной задачей для машиностроения.

Анализ последних исследований и публикаций. В работе [3] показано, что для механической обработки цветных металлов (медь, латунь и т.д.) эффективно использовать алмазные инструменты, характеризующиеся высокой твердостью и теплопроводностью и низким коэффициентом трения. Это позволило на операциях тонкого точения существенно уменьшить силовую напряженность процесса резания по сравнению с резанием твердосплавным инструментом. В работе [4] обоснована эффективность алмазно-абразивной обработки цветных металлов. Однако, сделанные выводы базируются на результатах экспериментальных исследований, установленных без учета функциональных связей между основными параметрами обработки. Это не позволяет в полной мере раскрыть закономерности и выявить технологические возможности механической обработки цветных металлов. Поэтому важно провести теоретический анализ параметров силовой напряженности механической обработки.

Цель работы – обоснование условий повышения эффективности механической обработки цветных металлов на основе установления и анализа расчетно-экспериментальных и аналитических зависимостей основных параметров силовой напряженности процесса резания.

Изложение основного материала. Для оценки силовой напряженности процесса резания воспользуемся аналитической зависимостью для определения энергоемкости обработки [5]:

$$\sigma = \frac{\sigma_{сжс}}{\operatorname{tg}\beta}, \quad (1)$$

где $\sigma_{сжс}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м²;

β – условный угол сдвига обрабатываемого материала.

Таблица 1

Расчетные значения отношений $\sigma_{сжс}/\sigma$ и $\sigma/\sigma_{сжс}$

β , град	0	10	20	30	45	60	80	90
$\sigma_{сжс}/\sigma$	0	0,176	0,364	0,866	1	1,732	5,671	∞
$\sigma/\sigma_{сжс}$	∞	5,681	2,747	1,155	1	0,577	0,176	0

В табл. 1 приведены рассчитанные по зависимости (1) значения отношений $\sigma_{сжс}/\sigma = \operatorname{tg}\beta$ и $\sigma/\sigma_{сжс}$. Как видно, с увеличением условного угла сдвига обрабатываемого материала β отношение $\sigma/\sigma_{сжс}$ непрерывно уменьшается, обращаясь при $\beta = 0$ в бесконечность. Необходимо отметить, что отношение $\sigma/\sigma_{сжс}$ принимает большие значения при условии $\beta < 10^\circ$. В диапазоне $10^\circ < \beta < 45^\circ$, в котором реализуются процессы абразивной и лезвийной обработки, отношение $\sigma/\sigma_{сжс}$ меньше и при условии $\beta \rightarrow 45^\circ$ приближается к единице. Следовательно, основным путем уменьшения энергоемкости обработки σ и эффективного ведения процесса резания является выполнение условия $\beta > 10^\circ$. Однако, реализовать его на практике удастся не всегда. Так, в работе [3] экспериментально установлено, что при тонком точении детали из меди М1 резцом из твердого сплава ВК6М (с нулевым передним углом) условный угол сдвига обрабатываемого материала β в зависимости от скорости резания ($V=100 - 700$ м/мин; подача $S=0,05$ мм/об; глубина резания $t=0,05$ мм) принимает значения $\beta = 7 - 10,5^\circ$. Соответственно, $\operatorname{tg}\beta = 0,12 - 0,18$, а, согласно зависимости (1), отношение

$\sigma/\sigma_{сжс}=5,5 - 8,3$. При этом рассчитанное на основе экспериментально установленной тангенциальной составляющей силы резания P_z отношение $\sigma/\sigma_{сжс}=17,4 - 39,5$ ($\sigma_{сжс}=380$ МПа). Энергоемкость обработки σ определялась по зависимости

$$\sigma = \frac{P_z}{S \cdot t} \quad (2)$$

Как видно, эти значения отношения $\sigma/\sigma_{сжс}$ значительно больше аналогичных значений $\sigma/\sigma_{сжс}$, полученных по зависимости (1) с учетом экспериментальных значений $\beta=7 - 10,5^0$. Это свидетельствует о том, что в энергетическом балансе значительную долю составляет энергия, затрачиваемая на преодоление силы трения задней поверхностью резца с обрабатываемым материалом, которая в несколько раз превышает долю энергии “чистого резания”. Следовательно, энергия, затрачиваемая на преодоление силы трения задней поверхностью резца с обрабатываемым материалом, многократно превышает энергию, затрачиваемую на осуществление процесса стружкообразования при резании.

При алмазном точении меди М1 условный угол сдвига обрабатываемого материала β больше и принимает значения $\beta=21 - 22^0$. Соответственно, $tg\beta=0,38 - 0,4$, а, согласно зависимости (1), отношение $\sigma/\sigma_{сжс}=2,5 - 2,63$. Уменьшение энергоемкости обработки σ связано с уменьшением коэффициента трения f обрабатываемого материала с передней поверхностью алмазного резца, что вытекает из известной формулы проф. Зворыкина К.А. для определения условного угла сдвига обрабатываемого материала

$$\beta = 45^0 + \frac{\gamma - \psi}{2}, \quad (3)$$

где γ – передний (положительный) угол инструмента;

ψ – условный угол трения обрабатываемого материала с передней поверхностью инструмента ($tg\psi = f$).

Как следует из зависимости (3), чем больше передний (положительный) угол инструмента γ и меньше угол трения ψ , тем больше угол β и меньше энергоемкость обработки σ , определяемая зависимостью (1). Таким образом, применение алмазного точения по сравнению с тонким точением (резцом из твердого сплава ВК6) вследствие уменьшения коэффициента трения f позволяет существенно увеличить условный угол сдвига обрабатываемого материала β и снизить силовую напряженность процесса резания.

Необходимо отметить, что при этом рассчитанное на основе экспериментально установленной тангенциальной составляющей силы резания P_z отношение $\sigma/\sigma_{сжс}=3,4 - 4,2$. По сравнению со значениями $\sigma/\sigma_{сжс}=2,5 - 2,63$, установленными на основе экспериментальных значений β , эти значения $\sigma/\sigma_{сжс}$ примерно в 2 раза больше. Объясняется это, как показано выше, наличием трения задней поверхности резца с обрабатываемым материалом. Однако, в данном случае доля энергии трения задней поверхности резца с обрабатываемым материалом в общем энергетическом балансе процесса резания значительно меньше, чем при точении резцом из твердого сплава ВК6М.

В работе [3] также экспериментально установлено, что при точении латуни алмазным резцом в зависимости от подачи ($S=0,02 - 0,14$ мм/об; $t=0,05$ мм; $\sigma_{сжс}=380$ МПа) угол $\beta=23,5 - 27^0$, а при тонком точении резцом из твердого сплава ВК6М – $\beta=13,5 - 19,3^0$. Как видно, при точении латуни угол β больше, чем при точении меди. Следовательно, меньше энергоемкость обработки и сила резания, что подтверждается экспериментами.

Рассчитанные по зависимости (1) для условий точения латуни твердосплавным резцом значения отношения $\sigma/\sigma_{сжс}=2,86 - 4,7$, а для условий точения алмазным резцом - $\sigma/\sigma_{сжс}=1,96 - 2,32$. Полученные на основе экспериментально установленной тангенциальной составляющей силы резания P_z (при точении твердосплавным резцом) значения отношения $\sigma/\sigma_{сжс}=6,35 - 9,72$, а при точении алмазным резцом - $\sigma/\sigma_{сжс}=3,57 - 4,14$. Как видно, в двух случаях доля энергии трения задней поверхности резца с обрабатываемым материалом в общем энергетическом балансе процесса резания примерно в 2 раза больше доли энергии “чистого резания”. Следовательно, основная часть энергетических затрат процесса точения уходит на преодоление силы трения задней поверхности резца с обрабатываемым материалом.

Необходимо отметить, что при микрорезании латуни по жесткой схеме (с постоянной скоростью резания $V=1$ м/с и толщиной среза 30 мкм) специально изготовленным индентором (алмазным конусом с углом при вершине $2\alpha=120^\circ$) на маятниковом приборе энергоемкость обработки принимает значение $\sigma=12\cdot 10^3$ Н/мм² [4]. Тогда отношение $\sigma/\sigma_{сж}$ принимает большее значение, чем при точении латуни алмазным резцом и равно 30. Как показано выше, доля энергии “чистого резания” при точении латуни составляет 30 % в общем энергетическом балансе процесса резания. Поэтому отношение $\sigma/\sigma_{сж} \approx 10$. Согласно зависимости (1) и табл. 2, условный угол сдвига обрабатываемого материала $\beta \approx 6^\circ$. Это значительно меньше, чем при точении алмазным резцом с нулевым передним углом ($\beta=21-22^\circ$). Исходя из зависимости (3), уменьшение угла β обусловлено отрицательным передним углом алмазного индентора, который равен $\gamma=-60^\circ$. Таким образом показано, что при микрорезании латуни имеет место процесс стружкообразования, т.к. угол $\beta > 0$. Однако, процесс осуществляется с чрезвычайно высокой энергоемкостью, обусловленной как неблагоприятными условиями стружкообразования, так и интенсивным трением алмазного индентора с обрабатываемым материалом. Вполне возможно, что при определенных условиях (при угле $\beta \rightarrow 0$) процесс стружкообразования может отсутствовать, а будет иметь место лишь процесс пластического деформирования материала. Собственно этим и объясняются проблемы абразивной обработки цветных металлов, связанные с высокой энергоемкостью обработки и низкими показателями качества и производительности. Из этого можно заключить, что основным путем повышения эффективности абразивной обработки такого пластичного материала, как латунь следует рассматривать применение в качестве абразивного материала алмазного порошка, который характеризуется наименьшим коэффициентом трения из всех абразивных материалов, а также высокой остротой режущих кромок, что уменьшает отрицательный передний угол зерна и тем самым способствует осуществлению процесса стружкообразования.

Таблица 2

Расчетные значения отношений $\sigma_{сж}/\sigma$ и $\sigma/\sigma_{сж}$ для $\beta=0-9^\circ$

β , град	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\sigma_{сж}/\sigma$	0	0,017	0,035	0,052	0,07	0,088	0,1	0,123	0,14	0,158
$\sigma/\sigma_{сж}$	∞	58,8	28,6	19,2	14,3	11,4	10	8,13	7,14	6,33

Проведем теоретический анализ энергоемкости обработки σ применительно к микрорезанию единичным зерном с увеличивающейся во времени толщиной среза a , приведенной в работе [6]:

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{сдв} \cdot \cos^2 \alpha}{\sqrt{\frac{a}{2R} - \operatorname{tg} \frac{(\alpha + \psi)}{2}}}, \quad (4)$$

где $\tau_{сдв} \approx 0,5 \cdot \sigma_{сж}$ – предел прочности на сдвиг обрабатываемого материала, Н/м²;
 α – угол входа абразивного зерна в обрабатываемый материал;
 R – радиус абразивного зерна, м.

При условии

$$\sqrt{\frac{a}{2R} - \operatorname{tg} \frac{(\alpha + \psi)}{2}} = 0 \quad (5)$$

энергоемкость обработки σ принимает бесконечно большое значение ($\sigma \rightarrow \infty$), поэтому процесс стружкообразования отсутствует, происходит лишь пластическое деформирование обрабатываемого материала (рис. 1). Предельное значение отношения a_1/R , при котором процесс пластического деформирования обрабатываемого материала переходит в процесс резания, определяется на основе преобразованной зависимости (5):

$$\frac{a_1}{R} = 2 \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{(\alpha + \psi)}{2}. \quad (6)$$

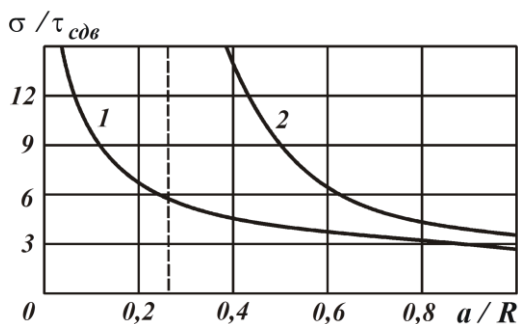


Рис. 1 – Зависимость $\sigma/\tau_{сдв}$ от отношения a/R : 1 – $\alpha=0^\circ$; 2 – $\alpha=40^\circ$

Очевидно, чем больше угол α , тем больше отношение a_1/R (рис. 2). Следовательно, увеличение угла α предполагает увеличение отношения a_1/R (предельной толщины среза a_1), что свидетельствует об ухудшении условий стружкообразования, т.к. увеличивается длина пути зерна в обрабатываемом материале до момента начала стружкообразования. Иными словами, с увеличением угла α до момента начала стружкообразования будет иметь место достаточно длительный процесс пластического деформирования материала. Поэтому с увеличением угла α (например, угла атаки при струйно-абразивной обработке), вполне возможно, что процесс стружкообразования может и не наступить, т.е. все время будет происходить процесс пластического деформирования материала.

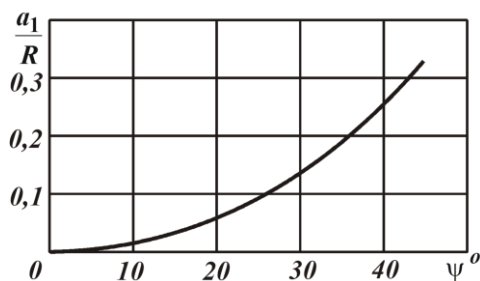


Рис. 2 – Зависимость отношения a_1/R от угла ψ

Данная закономерность обусловлена уменьшением переднего (отрицательного) угла режущего зерна γ по мере увеличения толщины среза a . При достижении определенного значения угла γ процесс пластического деформирования материала переходит в процесс резания (стружкообразования). Следовательно, при резании абразивным зерном в отличие от резания резцом (с фиксированным отрицательным передним углом γ) процесс стружкообразования осуществим во всем возможном диапазоне изменения угла $\alpha=0\dots90^\circ$. Однако, для этого

необходимо предварительно достичь предельной толщины среза a_1 , при которой происходит переход от процесса пластического деформирования материала к процессу резания.

Исходя из зависимости (6), процесс пластического деформирования материала наступает тем быстрее, чем меньше угол α . При относительно небольших углах α процесс стружкообразования может даже не наступить – все время будет происходить процесс пластического деформирования материала. Поэтому при обработке пластичных материалов вследствие специфики их пластического деформирования выполнить условие (6) можно значительно проще, чем при обработке хрупких материалов. Особенно это относится к резанию пластичных материалов с небольшими углами α . В этом случае длина дуги контакта передней поверхности зерна с обрабатываемым материалом увеличивается и фактический угол α становится как бы больше его номинального значения, что облегчает процесс стружкообразования. С увеличением угла α , фактический угол α существенно увеличивается и условие (6) становится невыполнимым, что исключает процесс стружкообразования и затрудняет сьем материала.

Для оценки достоверности сделанного вывода рассмотрим процесс резания с увеличивающейся во времени толщиной среза. Тангенциальную составляющую силы резания P_z представим в виде [5]:

$$P_z = \sigma \cdot S = HV \cdot S_0, \quad (7)$$

где $S = a \cdot b$ – площадь поперечного сечения среза, m^2 ;

a, b – толщина и ширина среза, m ;

$S_0 = a_0 \cdot b$ – фактическая площадь контакта режущего зерна с обрабатываемым материалом, m^2 ;

a_0 – фактическая длина контакта режущего зерна с обрабатываемым материалом, m ;

HV – твердость обрабатываемого материала (по Виккерсу), H/m^2 .

Энергоемкость обработки σ в данном случае определяется зависимостью (4). Из зависимости (7) определим величину a_0 :

$$a_0 = a \cdot \frac{\sigma}{HV}. \quad (8)$$

Подставляя зависимость (4) в (8) с учетом $\sigma_{сж} \approx \sigma_{вр}$ (где $\sigma_{вр}$ – временное сопротивление обрабатываемого материала, H/m^2), имеем

$$a_0 = \frac{\sigma_{вр}}{HV} \cdot \frac{a \cdot \cos^2 \alpha}{\sqrt{\frac{a}{2 \cdot R} - \operatorname{tg} \frac{(\alpha + \psi)}{2}}}. \quad (9)$$

С увеличением параметров a и α фактическая длина контакта режущего зерна с обрабатываемым материалом a_0 увеличивается. В полученной зависимости (9) все величины

известны, что позволяет определить значение a_0 . В табл. 3 [7] приведены значения отношения $\sigma_{\text{ср}} / HV$ для разных обрабатываемых материалов.

Как видно, отношение $\sigma_{\text{ср}} / HV$ для пластичных материалов (медь, сталь) больше, чем для хрупких материалов (твердый сплав, серый чугун). Следовательно, согласно зависимости (9), будут больше и значения a_0 , что способствует улучшению условий стружкообразования при резании. Из этого вытекает эффективность обработки пластичных материалов при относительно небольших значениях угла α .

Таблица 3

Значения твердости HV , временного сопротивления $\sigma_{\text{ср}}$ и их отношения $\sigma_{\text{ср}} / HV$ (и $HV / \sigma_{\text{ср}}$) для разных обрабатываемых материалов

Материал	$HV \cdot 10, \text{Н/мм}^2$	$\sigma_{\text{ср}} \cdot 10, \text{Н/мм}^2$	$\sigma_{\text{ср}} / HV$	$HV / \sigma_{\text{ср}}$
Никель	120	65	0,53	1,9
Армко-железо	120	67	0,53	1,9
Медь	60	30	0,5	2
Сырая сталь У8	190	80	0,43	2,3
Сталь P12Ф5М	950	290	0,31	3,2
Закаленная сталь У8	690	170	0,25	4
Закаленная сталь ШХ15	740	140	0,19	5,3
Быстрорежущая сталь Р9	830	190	0,23	4,37
Серый чугун СЧ 18-36	180	23	0,14	7
Цинк	40	4	0,1	10
Твердый сплав ВК8	1500	130	0,09	11,5
Сталь 40Х (при различной температуре отпуска после закалки)	200	63	0,33	2,96
	280	90	0,29	3,46
	350	92	0,3	3,33
	415	93	0,22	4,46
	510	104	0,2	4,94

При обработке хрупких материалов, в связи с небольшой величиной $a_0 \approx a$, процесс резания (стружкообразования) при небольших углах α может быть неосуществим. Он возможен при увеличенных значениях угла α , т.е. при увеличенных толщинах среза a . Это согласуется с известными экспериментальными данными, полученными при исследовании методов струйно-абразивной обработки: повысить эффективность обработки деталей, изготовленных из хрупких материалов, можно при угле входа абразивного зерна в обрабатываемый материал, равном или близким к 90° , а при обработке деталей, изготовленных из пластичных материалов, – при углах $10 - 30^\circ$.

Выводы

1. Расчетно-экспериментальным путем определена энергоемкость лезвийной и абразивной обработки деталей из цветных металлов и показано, что она принимает достаточно большие значения, существенно (до 30 раз) превышающие предел прочности на сжатие материала, в особенности при абразивной обработке.
2. Установлено, что доля энергии резания, затрачиваемая на преодоление силы трения задней поверхности инструмента с обрабатываемым материалом, в 2 раза и более превышает долю энергии “чистого резания”. Установлено также, что применение алмазных лезвийных и абразивных инструментов позволяет существенно уменьшить энергоемкость обработки цветных металлов на финишных операциях.
3. На основе установленной аналитической связи между энергоемкостью обработки и толщиной среза обоснованы условия перехода от процесса пластического деформирования материала к процессу резания для различных форм микросрезов при абразивной обработке, что согласуется с известными экспериментальными данными, полученными при исследовании методов струйно-абразивной обработки.

Список использованных источников:

1. Технология машиностроения: Учебник / А. В. Якимов, В. М. Царюк, А. А. Якимов и др. – Одесса: Астропринт, 2001. – 608 с.
2. Евсеев Д.Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке / Д.Г. Евсеев. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. –127 с.
3. Зубарь В. П. Исследования особенностей процесса алмазного точения: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Зубарь Владимир Петрович. – Харьков, 1967. – 210 с.
4. Синтетические алмазы в машиностроении / Под ред. В.Н. Бакуля. – К.: Наук. думка, 1976. – 351 с.
5. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 1. "Механика резания материалов" – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с.
6. Андiлахай О.О. Математична модель визначення енергоємності абразивної обробки та умов її зменшення / О.О. Андiлахай, І.В. Гершиков // Вісник НТУ "ХПІ". Збірник наукових праць. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Х.: НТУ "ХПІ". – 2012. – № 54 (960). – С. 3-13.
7. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке / Э.В. Рыжов, А.А. Сагарда, В.В. Ильицкий, И.Х. Чеповецкий. – К.: Наук. думка, 1979. – 244 с.

Bibliography:

1. Tekhnologiya mashinostroeniya: Uchebnik / A. V. Yakimov, V. M. Tsaryuk, A. A. Yakimov i dr. – Odessa: Astroprint, 2001. – 608 s.
2. Evseev D. G. Formirovanie svoystv poverkhnostnykh sloev pri abrazivnoy obrabotke / D. G. Evseev. – Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1975. –127 s.
3. Zubar V. P. Issledovaniya osobennostey protsesssa almaznogo tocheniya: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.03.01 / Zubar Vladimir Petrovich. – Kharkov, 1967. – 210 s.
4. Sinteticheskie almazy v mashinostroeniy / Pod red. V. N. Bakulya. – K.: Nauk. dumka, 1976. – 351 s.
5. Fiziko-matematicheskaya teoriya protsesssov obrabotki materialov i tekhnokogiy mashinostroeniya / Pod obsh. red. F. V. Novikova i A. V. Yakimova. V 10 tomakh. – T. 1. "Mekhanika rezaniya materialov" – Odessa: ONPU, 2002. – 580 s.
6. Andilakhay A.A. Matematichna model vyznachennya energoemnosti abrazivnoy obrobky ta umov yi zmenshennya / A. A. Andilakhay, I. V. Gershikov // Visnik HTU "KhPI". Zbirnik naukovykh prats. Seriya: Matematychno modelyuvannya v tekhnitsi ta tekhnologiyakh. – Kh.: HTU "KhPI". – 2012. – № 54 (960). – S. 3-13.
7. Kachestvo poverkhnosti pri almazno-abrazivnoy obrabotke / E. V. Ryzhov, A. A. Sagarda, V. B. Iiitskiy, I. K. Chepovetskiy. – K.: Nauk. dumka, 1979. – 244 s.

Рецензент: С.С. Самогугин
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ "ПГТУ"

Статья поступила 10.06.2013