

УДК 621.923:658.512

М.Л. Хейфец, д.т.н., проф.*Отделение физико-технических наук НАН Беларуси Л.Г.***Полонский, д.т.н., проф.***Житомирский государственный технологический университет*

СТРУЖКООБРАЗОВАНИЕ И ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКЕ

Предложена модель напряженного состояния технологической среды при лезвийной обработке. Проведен анализ кинетики структурообразования в инструментальном и обрабатываемом материалах. Исследованы теплофизические процессы применения лезвийных инструментов в металлообработке. Показано, что стружкообразование и формирование поверхности при лезвийной обработке характеризуется цикличностью состояний структур поверхностного слоя. Предложено структурообразование в технологической среде описывать переходом объемной вязкости в динамическую через ротационную. Изучены взаимосвязи процессов стружкообразования с изнашиванием и разрушением инструментов и даны технологические рекомендации.

Ключевые слова: лезвийная обработка; стружкообразование; формирование поверхности; инструмент.

Введение. Постановка проблемы. Для исследования условий рационального применения инструментов, свойств формирующегося поверхностного слоя обрабатываемого изделия, представляющего собой в процессе обработки хрупкую, упругую, пластичную, вязкую или другую среду [1, 2], необходимо описать состояния инструментального и обрабатываемого материала параметрами [3], которые при значительных изменениях внешних воздействий отражают фазовые переходы [4].

Моделирование напряженного состояния технологической среды при обработке. Движения потоков вещества в объеме технологической среды сопровождаются явлением внутреннего трения. Динамические касательные τ_d и нормальные σ_d напряжения внутреннего трения в движущейся среде описываются формулой Ньютона [3]:

$$\tau_d = -(\nu\rho)\sigma_d \text{grad}\vec{v} \quad (1)$$

и характеризуются первой (или динамической) вязкостью:

$$\eta = \nu\rho,$$

где ν – кинематическая вязкость; ρ – плотность среды; $grad\vec{v} = d\vec{v}/d\vec{n}$ – градиент скорости движения слоев среды \vec{v} в направлении внутренней нормали \vec{n} к поверхности слоя.

При сжатии или растяжении среды наряду с σ_d в направлении \vec{n} возникают нормальные напряжения σ_0 , вызываемые динамическим трением [3]:

$$\sigma_0 = -(\zeta/\rho)d\rho/d\sigma_d = -\zeta div\vec{v}, \quad (2)$$

которые описываются второй (или объемной) вязкостью ζ .

Устойчивость состояний технологической среды [4] описывается уравнением баланса во времени t локальной плотности энтропии $\rho\varepsilon$ [5, 6]:

$$d(\rho\varepsilon)/dt + div(\rho\varepsilon\vec{v}) + div\vec{F}_\varepsilon = \sigma, \quad (3)$$

где \vec{F}_ε – плотность потока энтропии ε ; $\sigma = d\varepsilon/dt$ – производство энтропии.

Исходя из того, что

$$\vec{v} = rot\vec{v}^*, \quad (4)$$

где \vec{v}^* – составляющая вращения в потоках среды, движущихся со скоростью \vec{v} (4), является решением уравнения (3), можно для описания состояний среды предложить третью (или ротационную) вязкость [4]:

$$\mu = 1/\nu^*,$$

где $\nu^* = (\sigma_z/\sigma_{yz})(v/S)$, в которой (σ_z/σ_{yz}) – соотношение трансляционной и ротационной составляющих напряженного состояния среды [7]; (v/S) – соотношение главного и дополнительного движений обрабатываемых изделий. Тогда добавочные касательные напряжения τ_0 будут представлены формулой:

$$\tau_0 = -(1/\nu^*)rot\vec{v}^* = -\mu rot\vec{v}^*. \quad (5)$$

Рассмотрим, согласно параметрам напряженного состояния технологической среды (1), (2) и (5), кинетику процессов изнашивания инструментов, стружкообразования и формирования свойств поверхностного слоя при возрастании скоростей главного v и дополнительного S движений обработки или увеличении мощности воздействий концентрированными источниками энергии (рис. 1, 2; табл. 1).

Стружкообразование и формирование поверхности в процессах лезвийной обработки. В процессе обработки на малой скорости при образовании опережающей хрупкой трещины скольжения (рис. 1, I;

рис. 2, I; табл. 1, I) состояние зоны формообразования определяется давлением на технологическую среду в направлении главного движения v сжимающим напряжением σ_z , пропорциональным объемной вязкости ζ . Если σ_z превышает критическое значение, то происходит разрушение берегов трещины, а образующиеся частицы раскалываются на более мелкие [8].

В том случае, когда частицы разрушения не имеют возможности вращаться (рис. 1, II; рис. 2, II; табл. 1, II), они повышают составляющую трения скольжения τ_{yz} между берегами трещины и компактируются скоплениями или элементами формирующейся суставчатой стружки при резании. Такая структура описывается соотношением (τ_{yz}/σ_z) , в котором τ_{yz} определяется в направлении геометрической суммы векторов главного движения и перемещений компактирующихся скоплений [8].

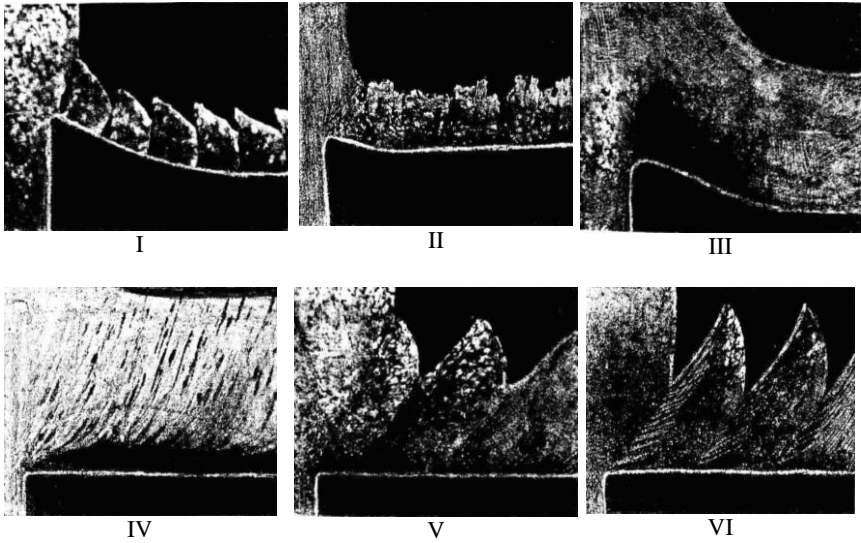
В процессе наростообразования (рис. 1, III; рис. 2, III; табл. 1, III) формирование вихревых диссипативных структур характеризуется соотношением (σ_{yz}/σ_z) [4], в котором σ_{yz} – ротационная, а σ_z – трансляционная составляющие напряженного состояния термдеформационного процесса. При этом ротационная составляющая $\sigma_{yz} = \sigma_y \cdot \sigma_z$ определяется в направлении вектора момента формообразования поверхности [4].

Пластическое течение поверхностных слоев обрабатываемого материала или формирование сливной стружки в процессе резания (рис. 1, IV; рис. 2, IV; табл. 1, IV) описывается составляющей сдвига τ_{yz} , характеризующей напряженное состояние вблизи условной плоскости сдвига [9].

Образование вихреподобных уплотненных структур, следующих за условной плоскостью сдвига (рис. 1, V; рис. 2, V; табл. 1, V), вновь определяется соотношением (σ_{yz}/σ_z) ротационной и трансляционной составляющих термдеформационного процесса [4].

При циклических адиабатических сдвигах или формировании ступенчатой стружки в процессе резания (рис. 1, VI; рис. 2, VI; табл. 1, VI) напряженное состояние описывается аналогично суставчатому стружкообразованию (τ_{yz}/σ_z) составляющими термопластического сдвига τ_{yz} и сжатия σ_z [10].

Образование жидкой фазы между контактирующими поверхностями (табл. 6, VII) характеризуется течением расплава материала с динамической вязкостью η пропорциональной касательным напряжениям τ_{yz} между условными слоями жидкости [10].



*Рис. 1. Стружкообразование в процессах лезвийной обработки:
 I – элементной стружки; II – суставчатой стружки;
 III – при наростообразовании; IV – сливной стружки;
 V и VI – ступенчатой стружки*

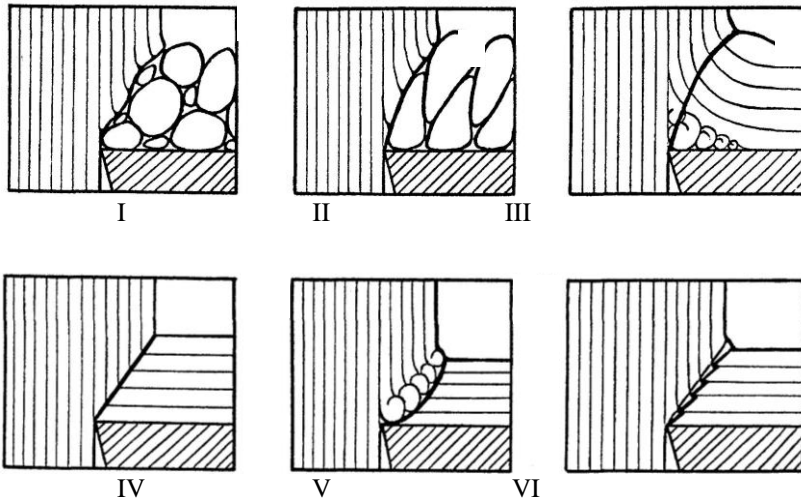


Рис. 2. Схемы этапов структурообразования в процессах формирования поверхности: I – хрупкое разрушение материала опережающей трещиной; II – компактирование частиц разрушения; III – вихревое образование застойных структур; IV – пластическое течение материала; V – волновое образование складок;

VI – расслоение материала адиабатическими сдвигами

Таблица 1

Изменения составляющих напряженного состояния материала, описывающих вязкость, при увеличении скорости обработки лезвийным инструментом

Стадии	I	II	III	IV	V	VI	VII
Скорость	v_I	$< v_{II}$	$< v_{III}$	$< v_{IV}$	$< v_V$	$< v_{VI}$	$< v_{VII}$
Напряженное состояние							
Вязкость	Объемная, ζ	Ротационная, μ				Динамическая, η	

Таким образом, кинетика процессов стружкообразования и формирования эксплуатационных свойств изделий при обработке инструментами характеризуется цикличностью состояний структур поверхностного слоя (табл. 1). При этом структурообразование в технологической среде описывается переходом объемной вязкости ζ (7) в динамическую η (6) через ротационную μ (10) со снижением числа степеней свободы термодинамической системы.

Учет циклических особенностей и свойств среды при переходе из одного состояния в другое в процессах стружкообразования и формирования структур поверхностного слоя позволяет рациональным образом выбрать инструменты для проектируемых методов обработки.

Взаимосвязь стружкообразования с изнашиванием и разрушением инструментов. Изучение процессов структурообразования при обработке инструментом с нагревом срезаемого слоя позволяет отметить, что с ростом интенсивности плазменного электродугового нагрева, вместе с изменением процессов стружкообразования происходит смена видов изнашивания и разрушения инструмента, формирующего обрабатываемую поверхность (табл. 2) [4].

При низкой интенсивности нагрева механотермическое изнашивание (табл. 2, I) в процессе приработки под воздействием давления σ_z приводит к сколам вдоль линии касательных напряжений τ_{yz} .

Дальнейшее изнашивание носит термоусталостный характер (табл. 2, II), а термоциклические напряжения σ_x создают трещины, по которым происходит выкрашивание в результате воздействия ротационной составляющей напряженного состояния σ_{yz} .

Повышение интенсивности нагрева до рациональных значений обеспечивает длительное механическое изнашивание (табл. 2, III), а разрушение наступает только при потере прочности лезвием, путем сколов по линии скольжения τ_{yz} .

При обработке вязких материалов наблюдается циклическая усталость (табл. 2, IV), сопровождающаяся растрескиванием от циклических напряжений σ_x и выкрашиванием с вращением фрагментов инструментального материала под действием σ_{yz} .

Таблица 2

Изменения составляющих напряженного состояния, описывающих изнашивание и разрушение лезвия инструмента при увеличении интенсивности дополнительного нагрева

Стадии	I	II	III	IV
Интенсивность нагрева	$I_I < I_{II} < I_{III} < I_{IV}$			
Напряженное состояние				
Обрабатываемый материал	Хромоникелевые порошковые наплавки	Наплавки стальными легированными проволоками	Высокопрочные наплавки порошками и проволоками	Жаропрочные хромоникелевые сплавы
Толщина срезаемого слоя, мм	до 0,2	до 0,4	до 0,3	до 0,5
Сила тока электрической плазменной дуги, А	40...60	30...50	80...100	100...120
Виды изнашивания	Механотермическое	Термоусталостное	Механическое	Усталостное циклическое
Допустимая величина износа, мм	0,1...0,2	0,3...0,4	0,5...0,7	0,8...1,0

Разрушение	Смятие, сколы	Трещины, выкраши- вания	Сколы (при потере прочности)	Трещины, выкраши- вания
------------	------------------	-------------------------------	------------------------------------	-------------------------------

Анализ видов стружкообразования (табл. 1) и изнашивания инструментов из сверхтвердых материалов (табл. 2) позволил рекомендовать использование дополнительного плазменного электродугового нагрева при обработке высокопрочных материалов и покрытий твердостью свыше 50 HRC.

Рассмотренные стадии кинетики изнашивания и разрушения инструмента I – II – III – IV (табл. 2) аналогичны стадиям структурообразования II – III – IV – V (табл. 1) при формировании стружки. Отсутствие I, VI и VII стадий свидетельствует о более узком диапазоне изменения свойств инструментальных материалов по сравнению с обрабатываемым под воздействием концентрированных потоков энергии.

Заключение. Состояние инструментального и обрабатываемого материала необходимо описывать параметрами, которые при значительных изменениях внешних воздействий отражают фазовые переходы при структурообразовании в поверхностных слоях. Кинетика процессов стружкообразования и формирования поверхности при лезвийной обработке характеризуется цикличностью состояний структур поверхностного слоя. Структурообразование в технологической среде инструментального и обрабатываемого материала описывается переходом объемной вязкости среды в динамическую через ротационную.

Список использованной литературы:

1. *Работнов Ю.Н.* Элементы наследственной механики твердых тел / *Ю.Н. Работнов.* – М. : Наука, 1977. – 384 с.
2. *Ильюшин А.А.* Основы математической теории термовязкоупругости / *А.А. Ильюшин, Б.Е. Победра.* – М. : Наука, 1970. – 280 с.
3. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент / под ред. *В.А. Григорьева, В.М. Зорина.* – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 560 с.
4. *Хейфец М.Л.* Проектирование процессов комбинированной обработки / *М.Л. Хейфец.* – М. : Машиностроение, 2005. – 272 с.

5. *Гленсдорф П.* Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуации / *П.Гленсдорф, И.Пригожин.* – М. : Мир, 1973. – 280 с.
6. *Эбелинг В.* Образование структур при необратимых процессах: введение в теорию диссипативных структур / *В.Эбелинг.* – М. : Мир, 1979. – 279 с.
7. *Лихачев В.А.* Введение в теорию дисклинаций / *В.А. Лихачев, Ю.Р. Хайров.* – Л. : ЛГУ, 1975. – 183 с.
8. О самоподобии процессов трения и изнашивания на различных масштабных уровнях / *Н.М. Алексеев* и др. // Трение и износ. – 1992. – Т. 13, № 1. – С. 161–171.
9. *Силин С.С.* Метод подобия при резании металлов / *С.С. Силин.* – М. : Машиностроение, 1979. – 152 с.
10. *Клименко С.А.* Режущий инструмент из ПСТМ на основе нитрида бора / *С.А. Клименко, Ю.А. Муковоз, Л.Г. Полонский.* – К. : Знание, 1994. – 36 с.

ХЕЙФЕЦ Михаил Львович – доктор технических наук, профессор, заместитель академика-секретаря Отделения физико-технических наук НАН Беларуси.

Научные интересы:

- материаловедение;
- оборудование и технология машиностроения;
- технологическое обеспечение качества и эксплуатационных свойств деталей машин.

ПОЛОНСКИЙ Леонид Григорьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры технологий машиностроения Житомирского государственного технологического университета.

Научные интересы:

- обработка материалов резанием.

Статья поступила в редакцию 26.06.2015