

ЦИКЛИЧНОСТЬ СОСТОЯНИЙ И СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МЕТАЛЛА В ПРОЦЕССЕ ОБРАБОТКИ

М.Л. Хейфец

Полоцкий государственный университет, Новополоцк, Беларусь
stnvpl@psu.unibel.by

Рассмотрена эволюция процессов формирования поверхностного слоя на основании характеристик напряженного состояния, представленных коэффициентами вязкости технологической и эксплуатационной среды.

Для исследования свойств поверхностного слоя изделия, представляющего собой в процессе обработки хрупкую, упругую, пластичную, вязкую или другую технологическую среду [1, 2], необходимо описать ее состояния параметрами, которые при значительных изменениях внешних воздействий остаются постоянными.

Движения различных потоков вещества в общем 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]:

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

и характеризуются первой (или динамической) вязкостью

$$\eta = \nu\rho$$

где ν - кинематическая вязкость; ρ - плотность среды; $\text{grad}v = dv/dn$ — градиент скорости движения слоев среды v в направлении внутренней нормали n к поверхности слоя.

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

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

которые описываются второй (или объемной) вязкостью ζ .

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

$$d(\rho\varepsilon)/d\tau + \text{div}(\rho\varepsilon v) + \text{div}F_\varepsilon = p \quad (3)$$

где F_ε - плотность потока энтропии ε , $p = d\varepsilon/d\tau$ - производство энтропии.

Исходя из того, что

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

где v^* - составляющая вращения в потоках среды, движущихся со скоростью v (4), является решением уравнения (3), можно для описания состояний среды предложить третью (или ротационную) вязкость: $\mu = 1/v^*$ [6], где $v^* = (\sigma_z/\sigma_{yz})(v/S)$ в которой (σ_z/σ_{yz}) - соотношение трансляционной и ротационной составляющих напряженного состояния среды [7], (v/S) - соотношение главного и дополнительного движений обрабатываемых из-

делий. Тогда добавочные касательные напряжения τ_0 будут представлены формулой

$$\tau_0 = -\left(1/\nu^*\right) \text{rot}v^* = -\mu \text{rot}v^* \quad (5)$$

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

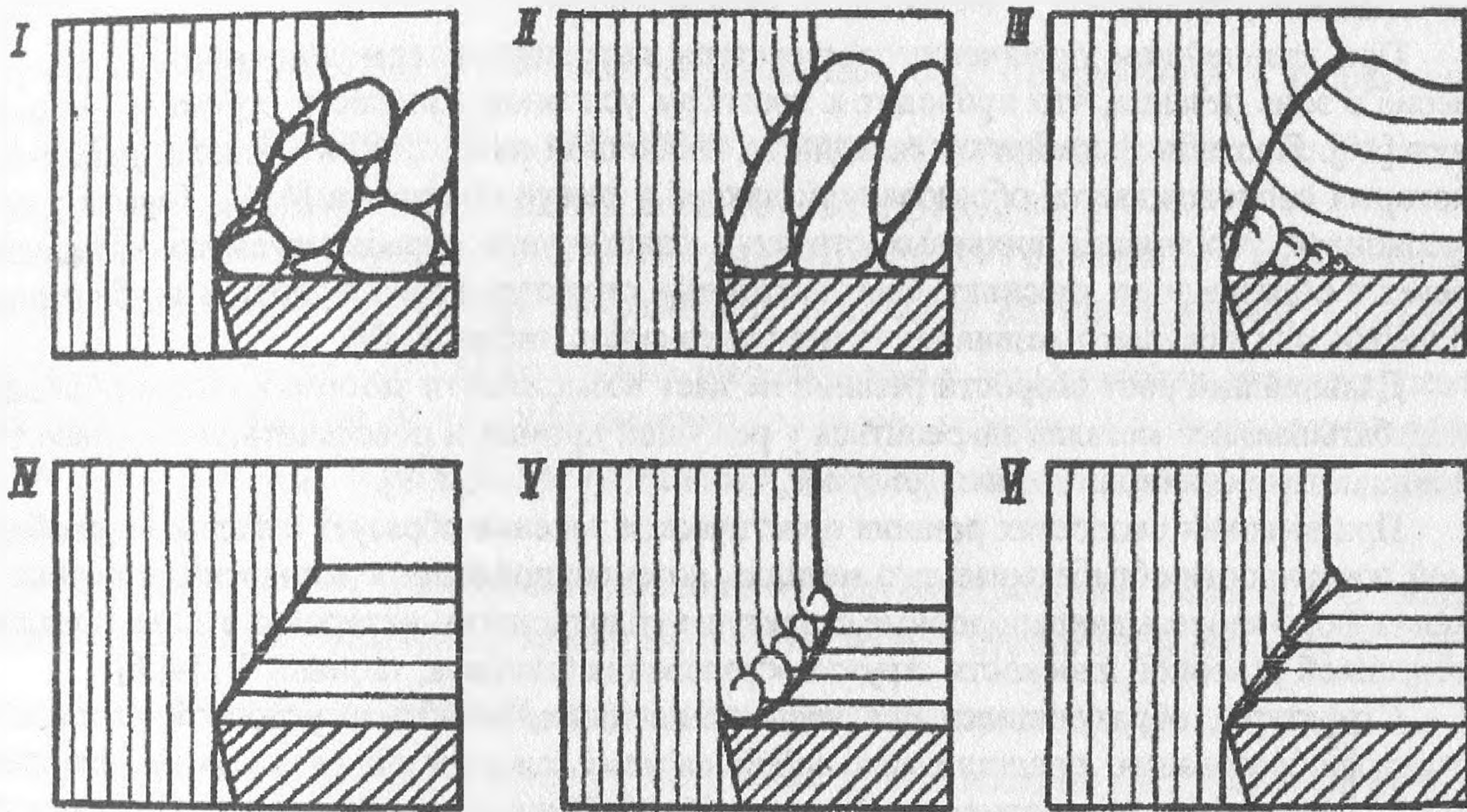


Рисунок. Схема этапов структурообразования в процессах формирования поверхности: I – хрупкое разрушение материала опережающей трещиной; II – компактирование частиц разрушения; III – вихревое образование застойных структур; IV – пластическое течение материала; V – волновое образование складок; VI – расслоение материала адиабатическими сдвигами

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	

Таблица. Изменение составляющих напряженного состояния и вязкости поверхностного слоя при увеличении интенсивности обработки

При хрупком разрушении металла на малых скоростях резания движение опережающей трещины скольжения сопровождается разрыхлением материала вследствие выкалывания частиц металла произвольных формы и размера (рисунок, таблица, I). Оказываясь в зоне проскальзывания и испытывая давление со стороны сжимающих берегов трещины скольжения, частицы приобретают вращательное движение [8, 9].

Если частицы выстраиваются в цепочку, то потенциальная энергия трибоконтакта будет минимальной. В том случае, когда трение между частицами велико и они способны к пластической деформации при повышении температуры с ростом скорости резания, то частицы компактируются в плотные скопления суставчатой стружки (рисунок, таблица, II).

При дальнейшем увеличении температуры нарушается термодинамическое равновесие в зоне резания, что приводит к прогибам условной плоскости стружкообразования [10]. Прогибы формируют складки на свободной поверхности металла, движение которых сопровождается образованием вихрей у режущей кромки [4, 6]. Термодеформационное упрочнение вихревых структур пластичного обрабатываемого материала ведет к образованию диссипативных застойных структур в виде наростов на передней поверхности режущего лезвия инструмента (рисунок, таблица, III).

Дальнейший рост скорости резания не дает возможности заторможенным объемам обрабатываемого металла закрепиться у режущей кромки и обеспечить устойчивое течение потока сливной стружки (рисунок, таблица, IV) [4, 6, 8, 9].

При высоких скоростях резания пластическое течение образует складки на свободной поверхности обрабатываемого металла, которые приводят к завихрениям потока и могут формировать вихреподобные структуры уплотненного материала в зоне, предшествующей условной плоскости стружкообразования (рисунок, таблица, V) [4, 6].

Структуры, образующиеся при увеличении давления вблизи условной плоскости стружкообразования, представляют собой систему плоскостей скольжения, которые могут расслаивать обрабатываемый металл [8, 9]. Цикл неустойчивого скольжения по вновь образованным плоскостям скольжения завершает завихрение течения, которое формирует участок ступенчатой стружки, отделенной от другого участка локализованной зоной адиабатического сдвига [4, 6]. Затем рассмотренный цикл повторяется многократно, в результате чего происходит циклическое образование ступенчатой стружки [11].

При дальнейшем увеличении температуры с ростом скорости резания на передней поверхности инструмента при трибоконтакте формируется жидкая фаза вторичных структур обрабатываемого и инструментального материала [12].

Рассмотренные кооперативные процессы являются внутренними регуляторами структур формирующихся в зоне стружкообразования и на контактных площадках инструмента, осуществляющими самоорганизацию в термодинамической обрабатываемой системе.

Эволюцию структур в обрабатываемой системе при глубине резания t можно описать термодинамическим критерием Рейнольдса $Re = vt/\nu^*$ [4, 6].

Рассмотрим составляющие напряженного состояния и их соотношения σ_z/σ_{yz} , определяющие вид и характеризующие устойчивость [4, 6] формирующихся в процессах резания и трения термодинамических диссипативных структур.

При образовании опережающей хрупкой трещины скольжения (рисунок, таблица, I) напряженное состояние описывается сжимающим напряжением σ_z в направлении главного движения v . Если σ_z превышает критическое значение, то происходит разрушение берегов трещины, а образующиеся частицы раскалываются на более мелкие [8, 9]. Если частицы разрушения не имеют возможности вращаться (рисунок, таблица,

II), то они повышают составляющую трения скольжения τ_{yz} между берегами трещины и элементами формирующейся суставчатой стружки. Такая структура описывается соотношением τ_{yz}/σ_z [8, 9], в котором τ_{yz} определяется в направлении геометрической суммы главного движения и перемещения стружки по передней поверхности инструмента.

При наростообразовании (рисунок, таблица, III) формирование вихревых диссипативных структур выражается соотношением σ_{yz}/σ_z [4, 6], в котором σ_z – трансляционная, а σ_{yz} – ротационная составляющие напряженного состояния термомодеформационного процесса [7]. Ротационная составляющая σ_{yz} , определяется в направлении вектора момента резания M_{yz} , перпендикулярного секущей плоскости, где происходят главное движение инструмента и перемещение стружки [13].

Формирование сливной стружки (рисунок, таблица, IV) описывается составляющей сдвига τ_{yz} , характеризующей напряженное состояние вблизи условной плоскости стружкообразования [14]. Образование вихреподобных уплотненных структур перед условной плоскостью стружкообразования (рисунок, таблица, V) также описывается соотношением σ_{yz}/σ_z [4, 6] ротационной и трансляционной составляющих процесса резания.

При циклическом образовании ступенчатой стружки (рисунок, таблица, VI) напряженное состояние выражается аналогично образованию суставчатой стружки τ_{yz}/σ_z [8, 9] составляющими сжатия σ_z и термопластического сдвига τ_{yz} .

Образование жидкой фазы между трущимися поверхностями инструмента и стружки описывается течением расплава вторичных структур обрабатываемого и инструментального материала с кинематической вязкостью $\nu = \tau_{yz}$, характеризующейся касательными напряжениями между условными слоями жидкости.

Результаты экспериментальных исследований процессов резания и трения различных материалов [6, 13] позволили определить критерий:

$$Re = t^x S^y \nu^z$$

где x, y, z – эмпирические показатели степени.

Величина критерия трибоконтактных процессов пропорциональна с постоянным коэффициентом C главной составляющей силы (или момента) формообразования поверхности

$$P_z = Ct^x S^y \nu^z$$

Установлено [6, 13], что при $x = 1,0$; $y = 0,7$; и $z = 0$ происходит стабилизация трибоконтактного процесса с устойчивым формированием сливной стружки при резании (рисунок, таблица, IV). Изменения x, y и z в ту или другую сторону отражают процессы формирования вихревых диссипативных структур: наростов (рисунок, таблица, III) и складок перед зоной адиабатического сдвига (рисунок, таблица, V).

Следовательно, определяя показатели степени x, y и z , можно оценить характер стружкообразования при разработке технологического процесса.

Анализ эволюции структур, формирующихся на контактных площадках и в зоне стружкообразования, осуществляющих самоорганизацию в процессах резания и трения при изменении режимов взаимодействия, позволил наметить основные направления создания оптимальных видов обработки резанием.

При образовании опережающих трещин скольжения, сдвигом стружкообразования и формировании наростов (рисунок, таблица, I-III) при резании на малых скоростях хрупких малопластичных материалов целесообразны радикальные термомеханические воздействия. Интенсификация процессов резания в этих случаях, а также при образовании сливной стружки особенно эффективна при использовании концентрированных источников энергии [6, 10].

Следует отметить, что необходимо согласование термических и механических воздействий для формирования рациональных структур в результате самоорганизации трибоконтактных процессов. Так, при обработке вязких титановых сплавов происходит интенсивное наростообразование на перемещающейся поверхности резца [6]. Увеличение скорости дополнительного перемещения до значений, обеспечивающих самоорганизацию процесса резания самовращающимся ротационным резцом [13], приводит к формированию сливной стружки и отсутствию наростообразования даже при обработке предварительно нагретых пластичных наплавленных материалов [6].

При наростообразовании, формировании сливной стружки и вихревых структур, образующих складки перед условной плоскостью стружкообразования (рисунок, таблица, III-V), при обработке хрупких, пластичных, вязких материалов в широком диапазоне скоростей резания целесообразны мероприятия, регулирующие трибоконтактные процессы. Рациональные условия трибоконтакта наиболее эффективно достигаются изменением макрохарактеристик: геометрии и коэффициента трения скольжения контактирующих поверхностей [6].

Создание специального профиля режущего клина [15] с учетом нанесения на рабочие поверхности инструмента износостойких антифрикционных покрытий позволяет избежать от образования в обрабатываемом материале застойных диссипативных структур вихревого характера. Так, нанесение карбида и нитрида титана на инструменты из твердого сплава и быстрорежущей стали предохраняет обрабатываемую поверхность сплавов от задира [16].

При формировании сливной стружки, вихревых структур, образующих складки и ведущих к адиабатическим сдвигам циклического формирования ступенчатой стружки (рисунок, таблица, IV-VI), при резании на высоких скоростях или с предварительным нагревом [10] труднообрабатываемых пластичных, вязких материалов целесообразны мероприятия, кардинально изменяющие трибоконтактные процессы. Повышение эффективности процессов резания возможно при использовании смазочных, охлаждающих технологических сред, а также путем формирования новых дополнительных фаз (рисунок, таблица, IV-VI), при образовании расплава [12] или аморфизированных структур [17, 18] между трущимися поверхностями. Использование охлаждения, смазки и присадок для регулирования приработки, снижения интенсивности изнашивания и для интенсификации процесса резания наиболее эффективно при высоких скоростях обработки.

Таким образом, эволюция процессов формирования эксплуатационных свойств изделий в процессах обработки металла характеризуется циклическостью состояний структур поверхностного слоя (таблица). При этом структурообразование в технологической среде описывается переходом объемной вязкости ζ (2) в динамическую η (1) через ротационную μ (5).

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

Список литературы

1. Работнов Ю.Н. Элементы наследственной механики твердых тел. М.: Наука, 1977. 384 с.
2. Ильюшин А.А., Победря Б.Е. Основы математической теории термовязкоупругости. 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. Цикличность состояний и свойств поверхностного слоя при комбинированных методах обработки металлов // Доклады Академии наук Беларуси. 1996. Т. 40, № 5. С. 120-123.
5. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах: Введение в теорию диссипативных структур. М.: Мир, 1979. 279 с.
6. Хейфец М.Л., Кожуро Л.М., Мрочек Ж.А. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей. Гомель. ИММС НАНБ, 1999. 276 с.
7. Лихачев В.А., Хайров Р.Ю. Введение в теорию дисклинаций. Л.: ЛГУ, 1975. 183 с.
8. Алексеев Н.М., Кузьмин Н.Н., Транковская Г.Р., Шувалова Е.А. О самоподобии процесса трения и изнашивания на различных масштабных уровнях // Трение и износ. 1992. Т. 13. № 1. С. 161-171.
9. Алексеев Н.М. Новое о структурных особенностях изнашивания твердых тел // Трение и износ. 1980. Т. 10. № 2. С. 197-205.
10. Обработка металлов резанием с плазменным нагревом / Под ред. А.Н. Резникова. М.: Машиностроение, 1986. 232 с.
11. Таланов Н.В. Физические основы процесса резания // Физические процессы при резании металлов. Волгоград: ВПИ, 1984. С. 3-37.
12. Klimenko S.A., Mukovoz Yu.A., Lyashko V.A., Vashohenko A.N. and Ogorodnik V.V. On the mechanism of cubic boron nitride base cutting tools // Wear, 1992. Vol. 157. N 1. P. 1-7.
13. Ящерицын П.И., Борисенко А.В., Хейфец М.Л. Синергетический подход к процессам резания металлов // Известия АН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. 1992, №1, с. 48-53.
14. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. М.: Машгиз, 1956. 480 с.
15. Шульц В.В. Форма естественного износа деталей машин и инструмента. Л.: Машиностроение, 1990. 208 с.
16. Верещак А.В., Третьяков И.П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1986. 208 с.
17. Верещак А.В., Горский В.В., Грипачевский А.Н. Развитие пластической деформации и формирование аморфно-кристаллического сплава Cu-Fe-O в зоне контактного взаимодействия пары трения Cu-Сталь 45 // Трение и износ, 1991. Т. 13. №4. С. 660-666.
18. Грипачевский А.Н., Верещак А.В., Горский В.В. Самоорганизация вторичных структур при трении меди и бронзы по стали // Трение и износ, 1992. Т. 13. №4. С. 647-653.