

УДК 621.9.01:536.75

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ВИДОВ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ НА ОСНОВЕ САМООРГАНИЗАЦИИ ТРИБОКОНТАКТНЫХ ПРОЦЕССОВ

М. Л. ХЕЙФЕЦ^а

Proceeding from the data relating energy and friction, evolution of structures is examined resulted from self-organized cooperative tribocontact processes. Some criteria are suggested to determine rational contact conditions and the methods of designing optimum cutting procedures.

Ключевые слова: самоорганизация, кооперативные, термомеханические, трибоконтактные процессы; деформация, резание и стружкообразование; приработка, трение, разрушение, износ; оборудование, оснастка и инструмент.

Введение. Прочность, вязкость, износостойкость и другие характеристики конструкционных материалов в настоящее время возрастают столь быстро, что процессы резания требуют постоянной интенсификации, совершенствования и создания новых видов обработки. Одна из актуальных проблем интенсификации процессов резания — обеспечение рациональных условий трибоконтакта инструмента с обрабатываемым материалом [1] и проектирование на основе этих условий оптимальных видов обработки [2, 3]. Прежде всего эта проблема обусловлена неустойчивостью контактных, деформационных процессов при резании и трении [4, 5] и требует изучения их взаимосвязи при формировании поверхности [6, 7].

Энергетическая взаимосвязь процессов резания и трения. Методы интенсификации процессов резания дополнительными механическими и тепловыми воздействиями и их взаимосвязь с приработкой, трением и разрушением поверхности в процессе изнашивания [6—8] представлены в таблице. Из нее видно, что для интенсификации всех видов резания, кроме абразивной обработки, используют подавляющее большинство типовых источников энергии. При абразивной обработке применяют только те источники, которые образуют на формируемой поверхности множество локализованных зон, и тем самым повторяют условия тепловыделения в процессе шлифования, а также тепловыделения в процессах приработки, трения и разрушения. Типовые источники, неиспользуемые при формировании поверхности резанием, в силу того что тепловыделение от них во многом подобно тепловыделению в процессе приработки, широко применяются для упрочнения поверхностей контртел — режущих инструментов [9].

Изучение распределения методов интенсификации процессов резания

^а Полоцкий государственный университет, Беларусь, 211440, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29.

и трения по геометрическим параметрам точности формируемой поверхности проводилось в зависимости от уровня концентрации различных типовых источников энергии (рис. 1). Точность поверхности оценивалась по отклонениям размеров и формы, по волнистости и шероховатости. Анализ точности формирования поверхности показывает, что от первого до последнего уровня концентрации энергии происходит повышение плотности мощности q , что в свою очередь ведет к снижению размеров зоны тепловыделения. Это уменьшение размеров зон тепловыделения приводит к повышению концентрации напряжений, поле которых определяет формируемую поверхность, ее точность.

Очевидно (рис. 1), что при приработке на уровне *I* точность не возрастает вследствие увеличения не столько концентрации энергии, сколько зоны тепловыделения. На уровне *II* точность минимальна в результате формирования поверхности по разбросанному в большом объеме концентраторам напряжений, образованным множеством локализованных зон тепловыделения. На уровне *III* точность не снижается, а затем и резко увеличивается за счет фокусировки локальной зоны тепловыделения, сопровождающейся ускоренным ростом концентрации напряжений. В процессах трения (рис. 1), наоборот, за повышением точности при увеличе-

Методы интенсификации резания, высокоэффективно (+) и малоэффективно (—) используемые для обработки конструкционных материалов

Плотность мощности типовых источников q , Вт/см ²	Процессы резания			
	лезвием	с вынужденным перемещением	самоперемещающимся	абразивом
<i>I Объемная зона тепловыделения</i>				
Процессы разрушения (ПР) $3 \cdot 10^3 \dots 10^3$	+	+	+	+
Индукционный нагрев (ИН) $10^2 \dots 10^3 \dots 10^4$	+	+	+	—
Газовое пламя (ГП) $10^2 \dots 10^3 \dots$ $3 \cdot 10^3$	+	+	+	—
Плазменная дуга (ПД) $5 \cdot 10^2 \dots$ $3 \cdot 10^4$	+	+	+	—
<i>II Множество локализованных зон</i>				
Процессы трения (ПТ) $10^3 \dots$ $3 \cdot 10^4$	+	+	+	+
Электроконтактный подогрев (ЭП) $10^3 \dots 5 \cdot 10^4$	+	+	+	+
Сварочная дуга (СД) $10^3 \dots$ $10^5 \dots 10^6$	+	+	+	+
Искровой разряд (ИР) $5 \cdot 10^3 \dots$ $8 \cdot 10^8$	—	—	—	—
<i>III Единственная локализованная зона</i>				
Процессы приработки (ПП) $10^3 \dots 3 \cdot 10^4 \dots 8 \cdot 10^8$	+	+	+	+
Электронный ионный луч (ЭЛ) $5 \cdot 10^3 \dots 10^6 \dots 8 \cdot 10^8$	—	—	—	—
Непрерывный лазер (НЛ) $5 \times$ $\times 10^3 \dots 10^6 \dots 10^9$	+	+	+	+
Импульсно-периодический лазер (ИЛ) $10^7 \dots 10^{10} \dots 10^{14}$	+	+	+	+

нии концентрации энергии следует ее снижение в результате того, что в отличие от обработки максимальной точности соответствует минимальное обновление поверхности.

Исследование энергетической взаимосвязи показывает, что при обработке и эксплуатации поверхностей благодаря конкурирующим совместным действиям резания и трения на контактных площадках и в зоне стружкообразования происходит эволюция кооперативных процессов.

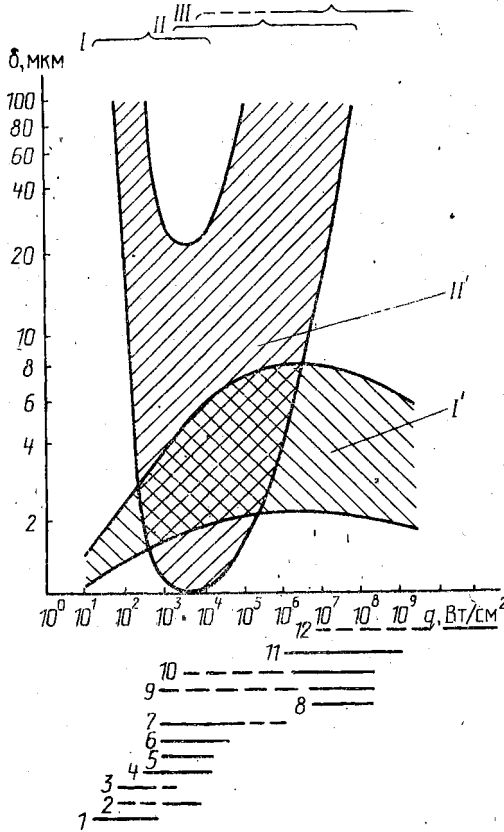


Рис. 1. Распределение методов интенсификации процессов резания (I') и трения (II') по точности формируемой поверхности в зависимости от уровня I—II—III концентрации энергии с плотностью мощности q для различных типовых источников: 1 — ПР; 2 — ИН; 3 — ГП; 4 — ПД; 5 — ПТ; 6 — ЭП; 7 — СД; 8 — ИР; 9 — ПП; 10 — ЭЛ; 11 — НЛ; 12 — ИЛ

Самоорганизация процессов резания и трения. Рассмотрим некоторые закономерности эволюции кооперативных процессов на контактных площадках и в зоне стружкообразования при возрастании скорости резания (рис. 2; 3).

При хрупком разрушении материала на малых скоростях резания движение опережающей трещины скольжения сопровождается разрыхлением материала вследствие выкалывания частиц материала произвольных формы и размера (рис. 2, а; 3, а). Оказываясь в зоне проскальзывания и испытывая давление со стороны сжимающих берегов трещины скольжения, частицы приобретают вращательное движение [10, 11].

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 уплотняются в плотные скопления суставчатой стружки (рис. 2, б; 3, б).

При дальнейшем увеличении температуры нарушается термодинамическое равновесие в зоне резания, что приводит к прогибам условной плоскости стружкообразования [12]. Прогибы формируют складки на свободной поверхности материала, движение которых сопровождается образованием вихрей у режущей кромки [4, 5]. Термодиформационное

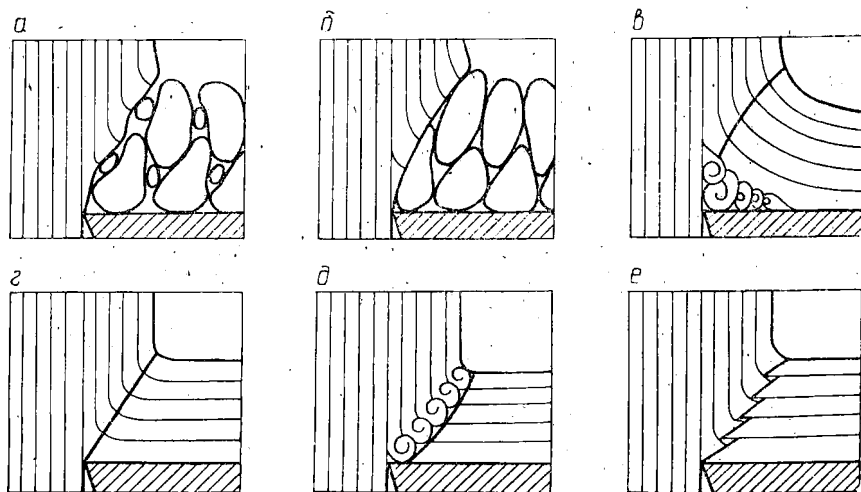


Рис. 2. Схема эволюции структур в процессах резания и трения: а — хрупкое разрушение материала опережающей трещиной; б — контактирование частиц разрушения; в — вихревое формирование застойных структур; г — устойчивое течение материала; д — волновое образование складок; е — расслоение материала адиабатическими сдвигами

упрочнение вихревых структур пластичного обрабатываемого материала ведет к образованию диссипативных застойных структур в виде наростов на передней поверхности режущего лезвия инструмента (рис. 2, в; 3, в).

Дальнейший рост скорости резания не дает возможности заторможенным объемам обрабатываемого материала закрепиться у режущей кромки и обеспечить устойчивое течение потока сливной стружки (рис. 2, г; 3, г) [4, 5, 10, 11].

При высоких скоростях резания пластическое течение образует складки на свободной поверхности обрабатываемого материала, которые приводят к завихрению потока и могут формировать вихреподобные структуры уплотненного материала в зоне, предшествующей условной плоскости стружкообразования (рис. 2, д; 3, д) [4, 5].

Структуры, образующиеся при увеличении давления вблизи условной плоскости стружкообразования, представляют собой систему плоскостей скольжения, которые могут расслаивать обрабатываемый материал [10, 11]. 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, 5]. Затем рассмотренный цикл повторяется многократно, в результате чего происходит циклическое образование ступенчатой стружки [13].

При дальнейшем увеличении температуры с ростом скорости резания

на передней поверхности инструмента при трибоконтате формируется жидкая фаза из расплавленного обрабатываемого материала [14, 15].

Рассмотренные кооперативные процессы являются внутренними регуляторами структур формирующихся в зоне стружкообразования и на контактных площадках инструмента, осуществляющими самоорганизацию в термомеханической системе резания—трения.

Критерии эволюции структур в процессах резания и трения. Эволю-

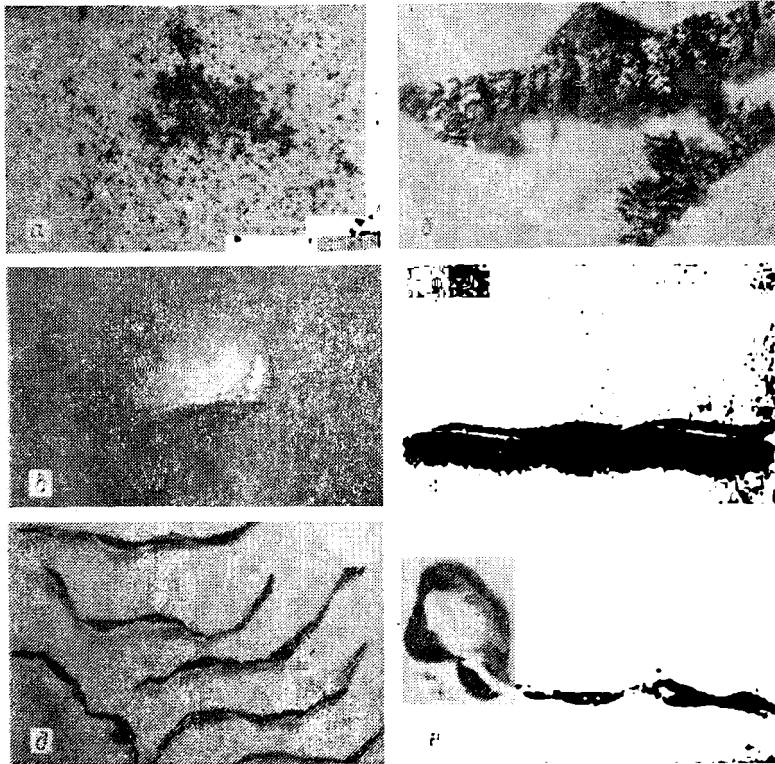


Рис. 3. Виды формирующейся стружки: *а* — элементная; *б* — суставчатая; *в* — нарост; *г* — сливная; *д—е* — ступенчатая циклическая (X5)

цию структур в системе резания—трения можно описывать термодинамическими критериями Рейнольдса ($Re=vt/\nu$) и Прандтля ($Pr=v/\omega$) [4, 5].

В критериях для определения вязкости условной технологической эксплуатационной среды введено выражение

$$\nu = \frac{\sigma_v}{\sigma_{cS}} \frac{v}{S},$$

включающее составляющие напряженного состояния среды на микроуровне σ_v , σ_{cS} и главную и дополнительную составляющие скорости обработки на макроуровне v , S .

Методики определения составляющих напряженного состояния для условных напряжений, характеризующих энергоемкость процессов резания и трения [16], эффективных напряжений, описывающих пластиче-

ское течение материала [17], а также временного сопротивления материала разупрочнению и разрушению [18] приведены в работах [2—5, 19].

Рассмотрим составляющие напряженного состояния и их соотношения (σ_v/σ_{vs}), определяющие вид и характеризующие устойчивость [4, 5] формирующихся в процессах резания и трения термодинамических диссипативных структур (рис. 4).

При образовании опережающей хрупкой трещины скольжения (рис.

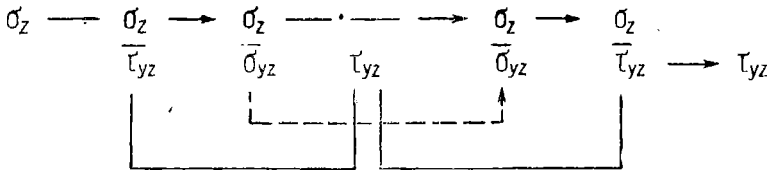


Рис. 4. Схемы изменения критериев при эволюции структур в процессах резания и трения

2, а; 3, а) 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 [10, 11]. Если частицы разрушения не имеют возможности вращаться (рис. 2, б; 3, б), то они повышают составляющую трения скольжения τ_{yz} между берегами трещины и элементами формирующейся суставчатой стружки. Такая структура описывается соотношением σ_z/τ_{yz} [10, 11], в котором τ_z определяется в направлении геометрической суммы главного движения и перемещения стружки по передней поверхности инструмента.

При наростообразовании (рис. 2, в; 3, в) формирование вихревых диссипативных структур выражается соотношением σ_z/σ_{yz} [4, 5], в котором σ_z — трансляционная, а σ_{yz} — ротационная моды, составляющие напряженного состояния термдеформационного процесса [20]. Ротационная составляющая σ_{yz} [2—5] определяется в направлении вектора момента резания M_{yz} , перпендикулярного секущей плоскости, где происходит главное движение инструмента и перемещение стружки.

Формирование сливной стружки (рис. 2, г; 3, г) описывается составляющей сдвига τ_{yz} , характеризующей напряженное состояние вблизи условной плоскости стружкообразования [21]. Образование вихреподобных уплотненных структур перед условной плоскостью стружкообразования (рис. 2, д; 3, д) также описывается соотношением σ_z/σ_{yz} [4, 5] ротационной и трансляционной составляющих процесса резания.

При циклическом образовании ступенчатой стружки (рис. 2, е; 3, е) напряженное состояние выражается аналогично образованию суставчатой стружки σ_z/τ_{yz} [10, 11] составляющими сжатия σ_z и термопластического сдвига τ_{yz} . Образование жидкой фазы между трущимися поверхностями инструмента и стружки описывается течением расплава обрабатываемого материала с кинематической вязкостью $\nu = \tau_{yz}$, характеризующейся касательными напряжениями между условными слоями жидкости [22].

Результаты экспериментальных исследований процессов резания и трения различных материалов [2—5, 19] позволили определить термодинамические критерии:

$$Re = Pe/Pr = t^x S^y v^z.$$

Величина критериев трибоконтактных процессов пропорциональна главной составляющей силы (или момента) формообразования поверхности

$$P_z = Ct^x S^y v^z.$$

Установлено [2—5, 19], что при $x=1,0$; $y=0,7$ и $z=0$ происходит стабилизация трибоконтактного процесса с устойчивым формированием сливной стружки при резании (рис. 2, *г*; 3, *г*). Изменения x , y и z в ту или другую сторону отражают процессы формирования вихревых диссипативных структур: наростов (рис. 2, *в*; 3, *в*) и складок перед зоной адиабатического сдвига (рис. 2, *д*; 3, *д*).

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

Проектирование оптимальных видов обработки резанием. Анализ эволюции структур, формирующихся на контактных площадках и в зоне стружкообразования, осуществляющих самоорганизацию в процессах резания и трения при изменении технологического и эксплуатационного факторов, а также режимов взаимодействия, позволил дифференцировать пути интенсификации и наметить основные направления создания оптимальных видов обработки резанием.

При образовании опережающих трещин скольжения, суставчатом стружкообразовании и формировании наростов (рис. 2, *а—в*; 3, *а—в*) 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 методов, представленных в таблице [6, 7].



Рис. 5. Нарост (*а*) при обработке титанового сплава ВТЗ-1 принудительно вращающимся ротационным резцом ($\times 10$) и стружки (*б*) при обработке с предварительным электродуговым нагревом наплавки проволокой Нп-30ХГСА самовращающимся резцом ($\times 5$) при соотношении скоростей самовращения и главного движения: 1 — 0; 2 — 0,1; 3 — 0,2; 4 — 0,3; 5 — 0,4; 6 — 0,5; 7 — 0,6

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 (рис. 5, а) [23]. Увеличение скорости дополнительного перемещения до значений, обеспечивающих самоорганизацию процесса резания самовращающимся ротационным резцом [19], приводит к формированию сливной стружки и отсутствию наростообразования даже при обработке предварительно нагретых пластичных наплавленных материалов (рис. 5, б) [24].

При наростообразовании, формировании сливной стружки и вихревых структур, образующих складки перед условной плоскостью стружкообразования (рис. 2, в—д; 3, в—д), при обработке хрупких, пластичных, вязких материалов в широком диапазоне скоростей резания [2, 3] целесообразны мероприятия, регулирующие трибоконтактные процессы. Рациональные условия трибоконтакта наиболее эффективно достигаются изменением макрохарактеристик: геометрии и коэффициента трения скольжения контактирующих поверхностей.

Создание специального профиля режущего клина [25] с учетом нанесения на рабочие поверхности инструмента износостойких антифрикционных покрытий [26], например ионно-вакуумными методами [9], позволяет избавиться 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.

При формировании сливной стружки, вихревых структур, образующих складки и ведущих к адиабатическим сдвигам циклического формирования ступенчатой стружки (рис. 2, г—е; 3, г—е), при резании на высоких скоростях или с предварительным нагревом [12] 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 в этих случаях (рис. 2, г—е; 3, г—е) и при образовании расплава [14, 15] или аморфизированных структур [27, 28] между трущимися поверхностями.

Так, использование охлаждения, смазки и присадок для регулирования приработки, снижения интенсивности изнашивания [8] и для интенсификации процесса резания [1] наиболее эффективно при высоких скоростях обработки и эксплуатации поверхностей.

Заключение. Таким образом, на основании проведенных исследований показано, что проектирование оптимальных видов обработки резанием заключается в:

— изучении структур, формирующихся в зоне стружкообразования и на контактных площадках инструмента в результате самоорганизации кооперативных процессов при обработке и эксплуатации конструктивных материалов;

— разработке оборудования с учетом полученных рекомендаций, дифференцированных для различных технологических и эксплуатационных процессов с учетом формирования рассмотренных структур;

— определении рациональных диапазонов режимов обработки и эксплуатации трущихся поверхностей при использовании разработанного оборудования и оснастки по предложенным критериям эволюции структур в процессах резания и трения.

Обозначения

δ — точность деформируемой и эксплуатируемой поверхности; q — плотность мощности источников энергии; v и S — скорости главного движения и подачи; t — толщина слоя; ω и ν — коэффициенты температуропроводности и кинематической вязкости среды; Re , Pg и Pe — критерии Рейнольдса, Прандтля и Пекле; σ_v , σ_{vs} — составляющие напряженного состояния в направлении v и совместных v и S движений; σ_y , σ_z , σ_{yz} и τ_{yz} — нормальные и касательные напряжения; P_z и M_{yz} — главные составляющие силы и момента формообразования поверхности; x , y и z — эмпирические показатели степеней.

Литература

1. Трение, изнашивание и смазка. Справ. в 2-х кн./Под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисына. Москва: Машиностроение, 2 (1979)
2. Попок Н. Н., Хейфец М. Л. Обеспечение рациональных условий трибоконтакта при резании труднообрабатываемых материалов и покрытий // Трение и износ, 14 (1993), № 3, 552—562
3. Popok N. N., Kheifetz M. L., Minevich A. A. Contact Conditions and Performance of Rotary Cutting Tools // Proc. of the 6th International Congress on Tribology EUROTRIB'93, Budapest, 1 (1993), 220—228
4. Хейфец М. Л. Исследование термодинамических неустойчивостей в процессах механической обработки. 1. Общее решение математической модели // Инженерно-физический журнал, 67 (1994), № 1-2, 141—145
5. Хейфец М. Л. Исследование термодинамических неустойчивостей в процессах механической обработки. 2. Численное исследование устойчивости // Инженерно-физический журнал, 67 (1994), № 1-2, 146—153
6. Хейфец М. Л. Пути повышения эффективности процессов формирования поверхностей с позиций синергетики // Вестн. машиностроения (1994), № 2, 22—25
7. Kheifetz M. L. Ways of Increasing Efficiency of Processes Forming Surfaces of Friction // Proc. of the International Symposium on the Tribology of Friction Materials, Yaroslavl, 2 (1991) 344—349
8. Надежность и долговечность машин / Под ред. Б. И. Костецкого. Киев: Техника (1975)
9. Верещака А. С., Тетьяков И. П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. Москва: Машиностроение (1986)
10. 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, 13 (1992), № 1, 161—171
11. Алексеев Н. М. Новое о структурных особенностях изнашивания твердых тел // Трение и износ, 10 (1989), № 2, 197—205
12. Обработка металлов резанием с плазменным нагревом / Под ред. А. Н. Резникова. Москва: Машиностроение (1986)
13. Талантов Н. В. Физические основы процесса резания // Физические процессы при резании металлов. Волгоград: Изд-во ВПИ (1984)
14. Klimentko S. A., Mukovoz Yu. A., Lyashko V. A., Vashohenko A. N. and Ogorodnik V. V. On the wear mechanism of cubic boron nitride base cutting tools // Wear, 157 (1992), N 1, 1—7
15. Клименко С. А., Муковоз Ю. А., Полонский Л. Г. Режущий инструмент из ПСТМ на основе нитрида бора. Киев: Знание (1994)
16. Старков В. К. Дислокационные представления о резании металлов. Москва: Машиностроение (1979)
17. Кузнецов В. Д. Физика резания и трения металлов и кристаллов. Избранные труды. Москва: Наука (1977)
18. Горезко П. А. Взаимосвязь процессов резания и растяжения металлов. Минск: Изд-во АН БССР (1959)
19. Ящерицин П. И., Борисенко А. В., Хейфец М. Л. Синергетический подход к процессам резания металлов // Изв. АН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук (1992), № 1, 48—53
20. Лихачев В. А., Хайров Р. Ю. Введение в теорию дисклинаций. Ленинград: Изд-во ЛГУ (1975)
21. Зорев Н. Н. Вопросы механики процесса резания металлов. Москва: Машгиз (1956)
22. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике. Москва: Наука (1980)
23. Попок Н. Н. Исследование процесса ротационного резания принудительно вращающимися инструментами: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Минск (1983)
24. Хейфец М. Л. Повышение эффективности обработки и качества деталей с из-

носостойкими покрытиями применением ротационного инструмента: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург (1992)

25. Шульц В. В. Форма естественного износа деталей машин и инструмента. Ленинград: Машиностроение (1990)

26. Миневич А. А., Хейфец М. Л. Механизм износа лезвий, упрочненных покрытиями и рекомендации по проектированию и эксплуатации инструментов с покрытиями // III Всесоюз. науч.-техн. совещ. «Пути повышения эффективности использования режущего инструмента»: Тез докл. Москва (1991), 79—81

27. 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, 12 (1991), № 4, 660—666

28. Грипачевский А. Н., Верещак А. В., Горский В. В. Самоорганизация вторичных структур при трении меди и бронзы по стали // Трение и износ, 13 (1992), № 4, 647—653

Поступила в редакцию 10.01.95.