

На правах рукописи



ИВАНОВ ЕВГЕНИЙ КОНСТАНТИНОВИЧ

**СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В
ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛАХ КАК СПОСОБ
ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТА**

Специальность: 05.16.09 – материаловедение (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский институт машиностроения (ЛМЗ-ВТУЗ)».

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках гранта № 05-08-65442а и при финансовой поддержке МинОбрНауки в рамках государственной целевой программы "Развитие научного потенциала высшей школы" № 2.1.2/12147.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Скотникова Маргарита Александровна

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
Кириллов Николай Борисович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
Мотовилина Галина Дмитриевна

Ведущая организация: Институт проблем машиноведения российской академии наук

Защита состоится "**20**" **декабря 2011 г.** в **16** ч. на заседании диссертационного совета Д 212.229.19 в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: **195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, лабораторно-аудиторный корпус, кафедра «Машины и технология обработки металлов давлением».**
Факс: (812) 540-01-59 e-mail: elmic@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан "**18**" **ноября 2011 г.**

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук,
профессор



Востров В.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие научно-технического прогресса в области создания лопаток паровых турбин из труднообрабатываемых материалов, в частности, титана и высоколегированных сталей, требует совершенствования существующих и разработки принципиально новых научно-обоснованных, контролируемых технологических процессов, учитывающих структурные и фазовые превращения в материале заготовки, как на этапе её механической обработки, так и в материале готового изделия на этапе его эксплуатации.

Сегодня применение высокоскоростной лезвийной обработки металлических заготовок является одним из основных направлений повышения производительности труда и качества получаемых поверхностей. При этом возникает проблема снижения износостойкости инструмента, его преждевременного разрушения и усиления интенсивности этого процесса с увеличением скорости резания сверх определённого уровня. Существует гипотеза о наличии здесь связи с локализацией пластической деформации в металле заготовки в результате высокоскоростного пластического деформирования и протеканием диссипативных процессов в зоне контактного взаимодействия по площадке износа вдоль грани инструмента.

Известно, что при лезвийной обработке металлических заготовок, на контактные процессы протекания деформации и микрорезания при стружкообразовании влияют многие факторы: физико-механические и химические свойства контактирующих материалов, геометрия инструмента, трение, скорость, степень и температура деформации. В широком диапазоне скоростей резания в граничном слое существуют различные виды контактного взаимодействия (контактное схватывание, фазовые превращения, вторичная структура, нарост, белый слой, окисление) и различные виды стружкообразования (образование стружек, сливных, элементных и адриабатических). Однако до сих пор не было работ, которые выявили бы единую физическую сущность технологических и трибологических процессов, развивающихся в контактной зоне, на основании единого подхода и рассмотрения трения и изнашивания, как начального этапа микрорезания при стружкообразовании.

Решение перечисленных проблем обеспечит повышение качества изделий получаемых механической обработкой и в частности, повысит надёжность работы паровых турбин, увеличит их срок эксплуатации, что является одной из наиболее важных народнохозяйственных проблем. Поэтому, работа по установлению закономерностей структурных и фазовых превращений, а также их влияния на повышение стойкости материала инструмента и надёжности работы готовых изделий после высокоскоростной обработки, является, безусловно, **актуальной**.

Цель работы и задачи исследования. Цель настоящей работы заключалась в изучении закономерностей структурных и фазовых превращений в материалах с различными коэффициентами обрабатываемости в широком интервале скоростей резания, направленных на повышение стойкости инструмента и надёжности работы готовых лопаток паровых турбин.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие *задачи*:

- разработать методику триботехнических испытаний материалов, которая позволит получить достоверные результаты;

- изучить и проанализировать причины потери работоспособности инструмента при повышении скорости механической обработки сверх определённого уровня;
- изучить условия продольного и поперечного оттеснения металла, предшествующего микрорезанию в зависимости от приложенных контактных напряжений и геометрии инструмента;
- исследовать структурные и фазовые превращения в объёме заготовок из материалов с различным коэффициентом обрабатываемости при высокоскоростной их механической обработке, с целью обеспечения возможности прогнозирования свойств поверхности и управления процессом стойкости материала инструмента;
- получить комплекс экспериментальных результатов по оценке кратковременных механических свойств исследованных сплавов при комнатной и повышенных температурах, оценке линейного износа инструмента;
- разработать испытательную центробежную установку (ИЦУ), имитирующую ударное воздействие частицами пара, позволяющую исследовать структурные и фазовые превращения в материале рабочих лопаток паровой турбины на этапе их эксплуатации.

Научная новизна.

- Впервые, процесс микрорезания при стружкообразовании рассматривается как этап достижения критической степени пластической деформации материала обрабатываемой заготовки и формирования зародышевой микротрещины. Инструмент, со свойственной ему геометрией, является концентратором контактных напряжений, которые возрастают с уменьшением его переднего угла.
- Показано, что пластическое оттеснение, предшествующее микрорезанию, в контактной зоне пары трения «инструмент – обрабатываемая заготовка», в зависимости от упруго-напряжённого состояния, может быть вызвано *продольной и поперечной пластической деформацией* относительно направления движения режущей кромки инструмента и, соответственно, формирование клина впереди движущегося инструмента или поперечных навалов.
- Показано, что в процессе механической обработки *труднообрабатываемых* материалов, обладающих относительно высокой прочностью, низкой теплопроводностью и высокими контактными температурами, в контактной зоне достигаются относительно *низкие контактные напряжения*, по величине не превосходящие половину уровня предельных сдвиговых напряжений в металле, и микрорезанию предшествует *поперечное пластическое оттеснение*.
- Показано, что в процессе механической обработки *легкообрабатываемых* материалов, обладающих относительно низкой прочностью, высокой теплопроводностью и низкими контактными температурами, в контактной зоне достигаются относительно *высокие контактные напряжения*, по величине превосходящие половину уровня предельных сдвиговых напряжений в металле, и микрорезанию предшествует *продольное пластическое оттеснение*.
- Для *эффективного повышения износостойкости инструмента*, необходимо, чтобы скорость деформационного упрочнения материала в контактной зоне преобладала над скоростью динамического разупрочнения за счёт структурной и концентрационной релаксации. То есть, необходимо создавать условия, чтобы

фактические контактные напряжения по величине превосходили половину уровня предельных сдвиговых напряжений в металле.

- В результате проведенных исследований получены новые технические решения, подтвержденные патентом РФ.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученный комплекс результатов структурных и фазовых превращений и физико-механических свойств материалов обрабатываемых заготовок позволил дать рекомендации для повышения износостойкости инструмента и повышения качества поверхности рабочих лопаток паровых турбин.

- Результаты работы были использованы на предприятиях ОАО “ЛМЗ”, ООО “Орис - ММ”, ООО “РеалИнПроект”.

- Результаты работы нашли отражение при разработке лабораторного практикума в рамках проводимых преподавателями лабораторных работ по дисциплинам «Физика технологических процессов в машиностроении» и «Компьютерные технологии при проектировании узлов трения»; при чтении автором лекций по дисциплинам «Основы теории смазки и смазочных материалов» и «Проектирование и расчет узлов трения», а также при разработке трёх учебных пособий.

Достоверность результатов обеспечивается использованием фундаментальных положений физики твёрдого тела, большим объёмом экспериментов, выполненных с привлечением современных методов исследования (стандартных и специально разработанных), сопоставлением установленных в работе закономерностей с фактами, полученными другими исследователями.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы и результаты исследований докладывались и обсуждались на 12 научно-технических конференциях и семинарах: 9 - ой международной конференции “Материаловедческие проблемы при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС”, СПб., 2006; 8 - ой Международной конференции «Пленки и покрытия», СПб., 2007; Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы трибологии», Самара, 2007; World Conference Friction, Wear and Wear Protection (DGM), German, held in Aachen, April 9 - 11, 2008; XVII Международной конференции «Физика прочности и пластичности материалов», Самара, СГТУ, 2009; II Международном семинаре «Техника и технология трибологических исследований», Иваново, ИГУ, 2009; World Conference “4 th World Tribology Congress” (WTC IV) Japan, Kyoto, September 6-11, 2009; на XX - ых «Петербургских чтениях по проблемам прочности», СПб., 2010; 49 Международная конференция Актуальные проблемы прочности 14 – 18 июня 2010 г. Киев, Украина; IX международной научно-практической конференции, «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» 09 - 11 декабря 2010 СПб.; «Повышение износостойкости и долговечности машин и механизмов на транспорте» 7 - 9 декабря 2010 СПб., СПбГПУ; научно-техническая конференция «Трибология - машиностроению», М., 2010.; 12 World Conference on Titanium, Beijing, China, June 19-24, 2011, а также на научно-технических семинарах кафедры «Триботехника» ПИМаш и в СПбГПУ 2006 - 2011г.г.

Публикации. Основное содержание работы отражено в 28 печатных работах, в том числе в 2 патентах, в 3-х статьях в изданиях, входящих в список ВАК РФ. Библиографический список основных работ приведён в конце автореферата.

Диссертационная работа была выполнена автором: – в рамках Гранта РФФИ № 05-08-65442 (2006-2008 гг.); – в рамках целевой программы "Развитие научного потенциала высшей школы" № 2.1.2/1247 (2009-2011 гг.) (н.р. проф. М.А. Скотникова).

Структура и объем работы Работа состоит из введения, 5 глав, общих выводов, списка литературы из 139 наименований и приложения, изложена на 176 страницах, включая: 9 - таблиц, 114 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель исследования, поставлены основные задачи. Показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, даны сведения об апробации работы.

В первой главе приведён обзор теоретических и экспериментальных результатов работ, посвящённых исследованию процессов высокоскоростной механической обработки у нас в стране и развитию вопроса в различных странах. Проводится анализ состояния вопроса, формулируются задачи комплексного исследования для увеличения срока службы режущего инструмента на различных структурно-масштабных уровнях с учётом волновой теории пластической деформации, физико-механических и тепловых процессов при высокоскоростном нагружении. В результате выполненного анализа определены основные задачи диссертационной работы.

Во второй главе сделано обоснование выбора материалов и основных методов для исследования. Исследования проводились как с использованием серийной аппаратуры, установок, компьютерных программ, так и оригинальных испытательных стендов. Методами оптической металлографии, просвечивающей и растровой электронной микроскопии, рентгеноструктурного, микрорентгеноспектрального анализа, испытания на макро- и микро- твёрдость, износостойкость, исследованы структурные и фазовые изменения, происходящие в материале заготовки и инструмента.

В третьей главе представлены результаты исследования влияния морфологии стружки на износостойкость инструмента в широком диапазоне скоростной резания.

Механическая обработка проводилась резцом ВК8 без смазки со скоростью подачи $S = 0,26$ мм/оборот и глубиной резания $t=1$ мм, в диапазоне скоростей резания 1...670 м/мин. Геометрические параметры резца составляли углы: $\varphi=45^\circ$; $\varphi_1=15^\circ$; $\alpha=6^\circ$; $\gamma = 12^\circ$. Проводились испытания на сплавах на основе алюминия (сплав АМц) в диапазоне скоростей резания до 6000 м/мин, железа (сталь 45, сталь ХВГ) при скоростях 3...670 м/мин и сплавах титана (ВТ-5, ВТ-23) при скоростях 1...230 м/мин. В таблице 1 представлены их химический состав и физико-механические свойства.

В направлении от алюминия к титану, имело место значительное увеличение температуры плавления, прочности, удельного электросопротивления, снижение коэффициента обрабатываемости (K_m), пластичности, коэффициента трения (μ), теплопроводности (λ), коэффициента теплового расширения (α) и увеличение отноше -

Таблица 1. Химический состав и физико-механические свойства исследованных сплавов.

Марка сплава	Химический состав, масс. %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	μ	λ , Вт/(м·К)	α , 10^{-6}K^{-1}	α/λ	K_M
АМц	Al-1,5 Mn-0,7 Fe-0,6 Si-0,1 Cu-0,1 Zn	110	60	33	1,9	160	23,9	0,15	1,0
Ст. 45	Fe-0,45 C-0,25 Si-0,6 Mn-0,3 Ni-0,25 Cr-0,3 Cu-0,035 S, P	600	355	16	1,67	49	11	0,22	0,8
ХВГ	Fe-1,0 C-0,3 Si-1,0 Mn-1,1 Cr-1,4 W-0,35 Cu-0,3 Mo-0,03 S, P	725	375	25	1,25	38	10	0,26	0,7
BT-5	Ti-5,0 Al-0,3 Fe-0,1 C-0,12 Si-0,8 Mo-1,2 V-0,3 Zr-0,2 O-0,01 H	800	720	12	0,63	12	8,6	0,72	0,35
BT-23	Ti-5,1 Al-0,25 Fe-0,1 C-0,15 Si-2,0 Mo-4,5 V-0,05 N-1,2 Cr-0,3 Zr	995	925	14	0,61	5	8,0	1,60	0,25

ния последних величин (α/λ), пропорционального внутренним напряжениям в материалах при теплосменах. Поэтому, по сравнению с алюминиевыми, в титановых сплавах перенапряжения оказываются выше и релаксационные процессы развиваются более активно.

На рис. 1 представлены, полученные в работе, сериальные кривые зависимостей прочностных свойств исследованных материалов от температуры их деформирования. Видно, что по сравнению с ХВГ, в сплаве BT23 интенсивное разупрочнение начинается уже при температуре деформации 500...600°C.

На рис. 2 представлены экспериментальные зависимости, демонстрирующие нарастание линейного износа инструмента с увеличением скорости лезвийной обработки исследованных сплавов. При обработке сталей ХВГ и 45 сериальные кривые износа имели точки перегиба при скоростях резания 170 и 650 м/мин, после чего интенсивность износа инструмента значительно возрастала. При обработке сплавов АМц и BT23, износ инструмента нарастал равномерно, без перегиба, с малой и большой интенсивностью износа, соответственно. На рис. 3 изображены обрабатываемая заготовка, резец и формирующаяся стружка с отмеченными местами локализации пластической деформации ($\epsilon_{\text{ЛОК}}$).

При обработке *алюминиевого сплава* АМц ($V_{\text{РЕЗ}} = 8...230$ м/мин) на поверхности стружки были видны, *параллельные направлению резания*, следы равномерной *продольной* пластической деформации без ее макроскопической локализации и образования отдельных сегментов рис. 5 (а,б), что обеспечивало *низкий износ* инструмента в широком диапазоне скоростей резания, рис. 2 (линия1). По известной классификации этот тип стружки относится к *сливной*, рис. 3а. Локализация пластической деформации в металле заготовки из сплава АМц наступала при скорости резания только свыше 6000 м/мин, рис. 5в.

При лезвийной обработке *сплавов титана* BT-5 и BT-23 ($V_{\text{РЕЗ}} = 1...380$ м/мин), на поверхности стружки были видны, *перпендикулярные направлению резания*, следы неравномерной *поперечной* пластической деформации, рис. 6 (д-к) с ее макроскопической локализацией и образованием стружки *локального адиабатического сдвига* с признаками разрушения в условиях сверхпластичности, рис.3в. При этом с увеличением скорости резания, *износ* резца резко *возрастал*, рис. 2(3). Такие материалы склонны к *усадке* стружки.

При обработке сплавов на *основе железа* ХВГ и стали 45 ($V_{\text{РЕЗ}} = 3,2...670$ м/мин) образовывались три вида стружек: *смятия* (суставчатая), рис.6а и рис.5г, *элементная*, рис. 6(б-в) и рис.5д, *локального сдвига*, рис.6г и рис.5ж, которые сменяли друг друга по мере увеличения скорости лезвийной обработки.

Измерения микротвёрдости проводились на микрошлифах приготовленных в продольной плоскости стружки в долевом и поперечном ее направлениях с шагом 20 мкм при нагрузке 20 г. в «прирезцовом» и в «свободном» крае по следу движения ударной волны инструмента, рис.7. Результаты измерения микротвёрдости имели волнообразный характер, с периодом 200...400 мкм равным ширине сегмента стружки, особенно

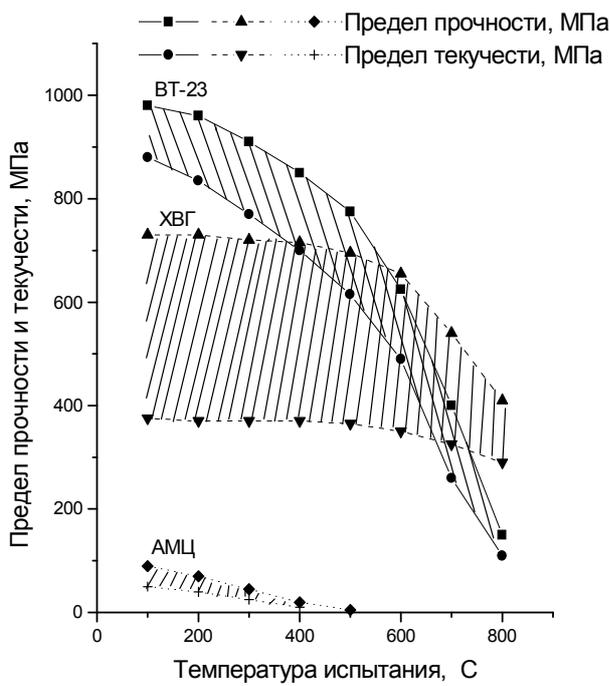


Рис. 1. Температурные зависимости сплавов АМц ; ХВГ; ВТ-23.

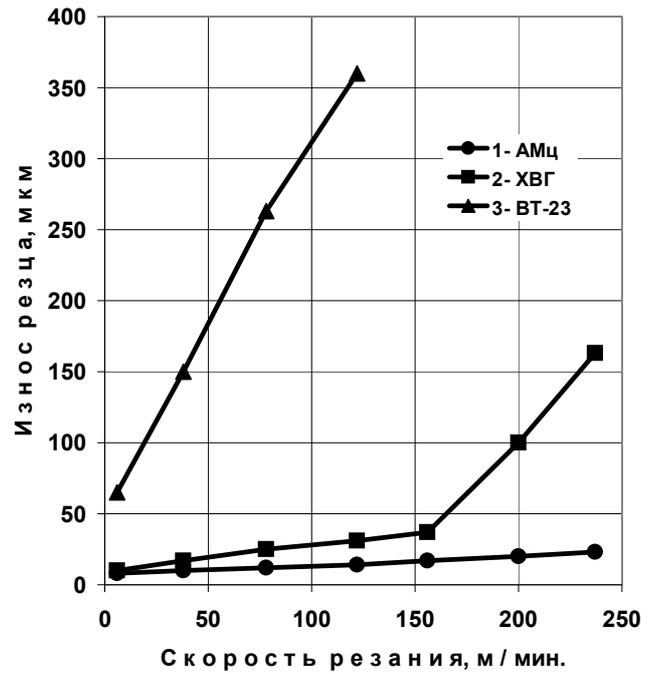


Рис. 2. Износ резца при лезвийной обработке исследованных сплавов АМц (1), ХВГ (2), ВТ-23 (3) с разными скоростями.

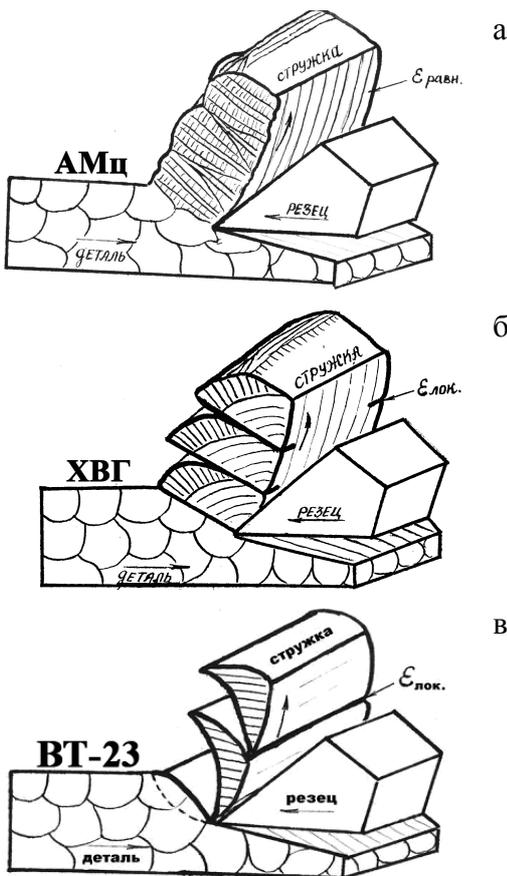


Рис.3. Схемы формирования «сливной» стружки (равномерная пластическая деформация) (а), «элементарной» (начало локализации деформации) (б), стружки «адиабатического» сдвига (сильная локализация деформации) (в).

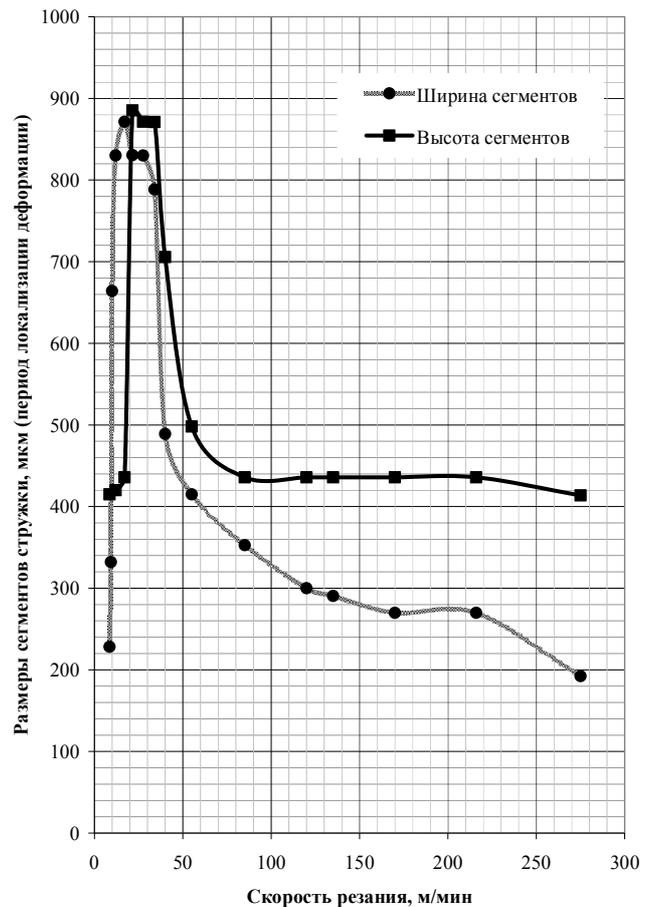


Рис.4. Зависимость изменения геометрических параметров сегментов стружки из стали ХВГ от скорости резания

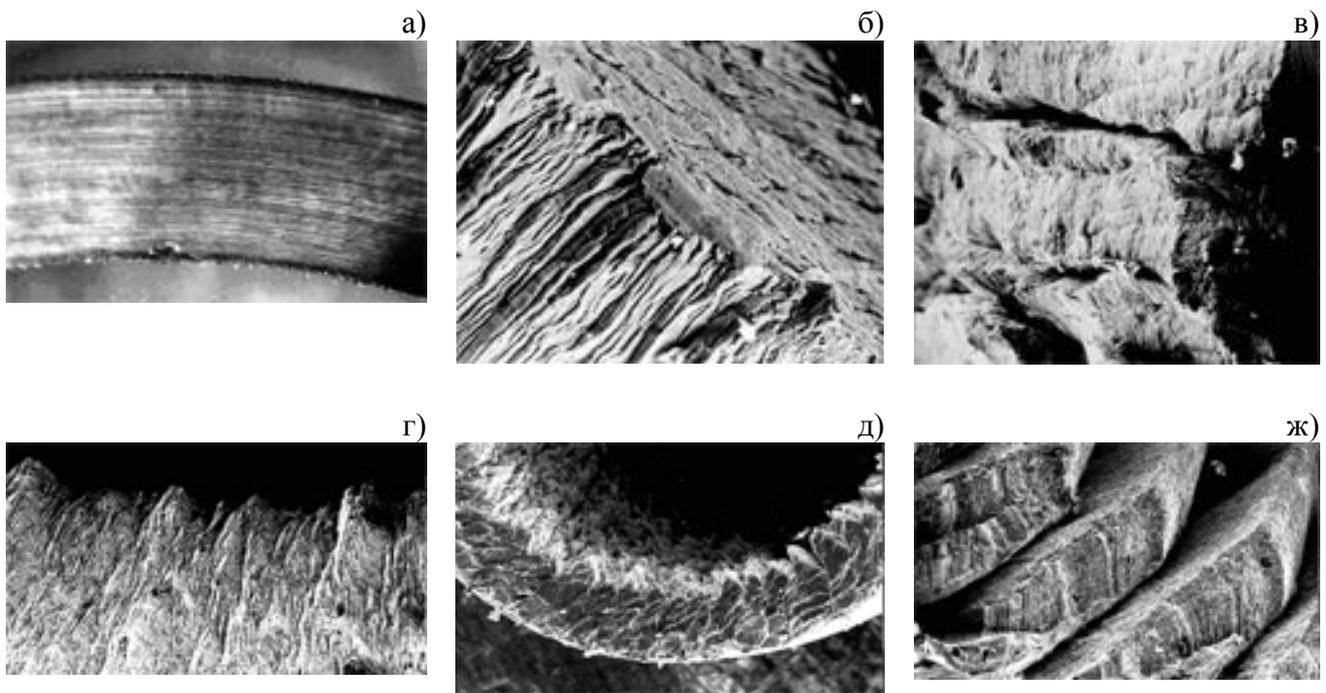


Рис.5. Морфологические особенности стружек заготовок из сплава АМц (а, б, в) и стали 45 (г, д, ж) при скоростях резания 230 (а, б), 6000 (в), 77 (г), 620(д), 670 м/мин (ж) х 400

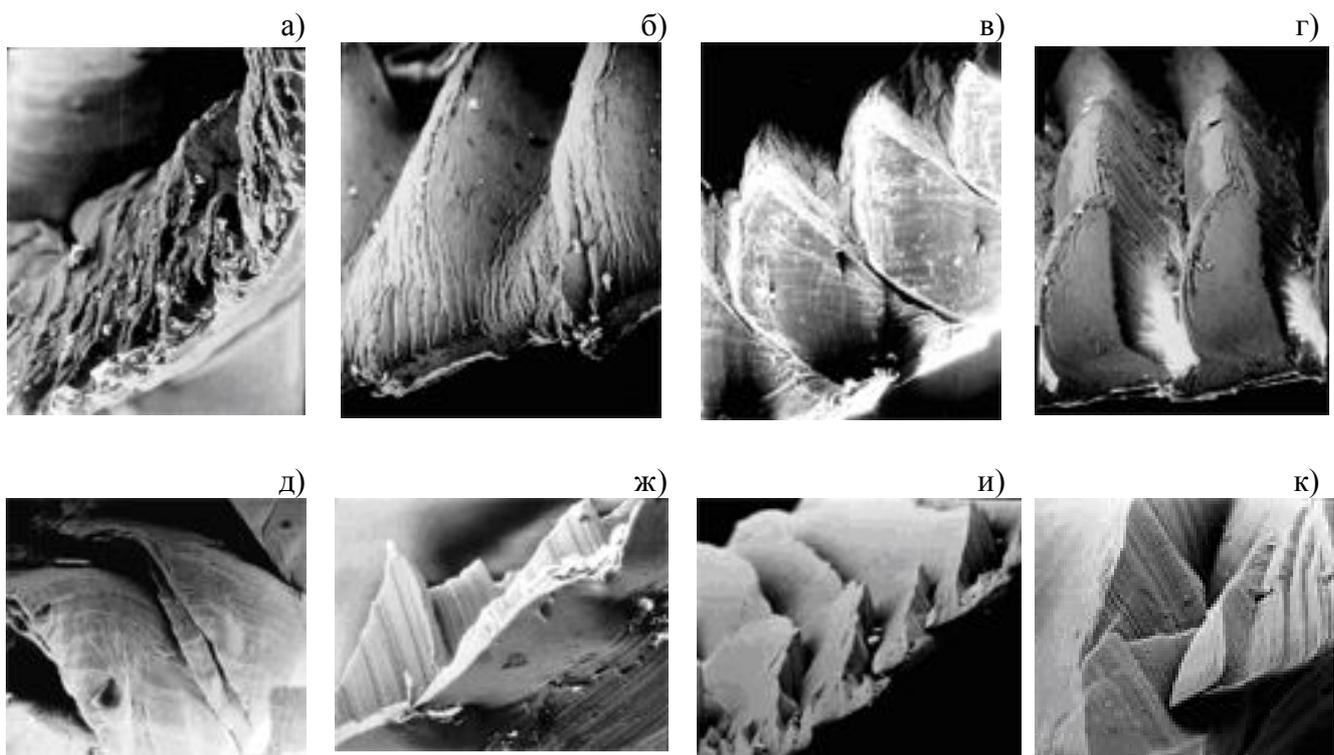


Рис.6. Морфологические особенности стружек заготовок из сплавов ХВГ (а, б, в, г), ВТ5 (д) и ВТ23 (ж, и, к) при скоростях резания 9 (а), 34 (б), 135 (в), 275 (г), 1 (д), 60 м/мин (ж,и,к) х 400

при измерениях, проведённых вдоль направления свободного края элементной стружки. Максимальные значения микротвёрдости приходились на места сочленения сегментов стружек, в которых с помощью просвечивающей электронной микроскопии было обнаружено формирование узких зон сверхмелкой наноструктуры.

Здесь абсолютные значения микротвёрдости для сплавов ВТ-23 и ХВГ достигали, соответственно, 4381 и 6438 МПа при средней твёрдости стружки 3761 и 4424 МПа. В сплаве АМц при средней твёрдости стружки 1193 МПа, локализации пластической деформации обнаружено не было, микротвёрдость изменялась мало по объёму стружки, рис. 7. По сравнению с исходным значением уровня микротвёрдости, в прирезцовом крае элементной стружки наблюдали упрочнение, а вблизи свободного (тыльного) её края – разупрочнение, что свидетельствует о прохождении там более интенсивных процессов тепловыделения и релаксации, рис.7.

Можно полагать, что при механической обработке материала заготовки при скоростях резания сверх определённой, впереди кромки инструмента формировалась *волна нагрузки*, направленная вдоль плоскости сдвига и модулирующая структуру материала, разбивая ее на мезо- объёмы размером 200...400 мкм, вдоль границ которых формировалась наноструктура с повышенной микротвёрдостью и которая снижала износ металла заготовки, но повышала износ инструмента.

Отразившись от поверхности заготовки, формировалась *разгрузочная волна* пластической деформации, обеспечивающая подключение ротационных (поворотных) мод пластической деформации и совершающая локализованные адиабатиче-

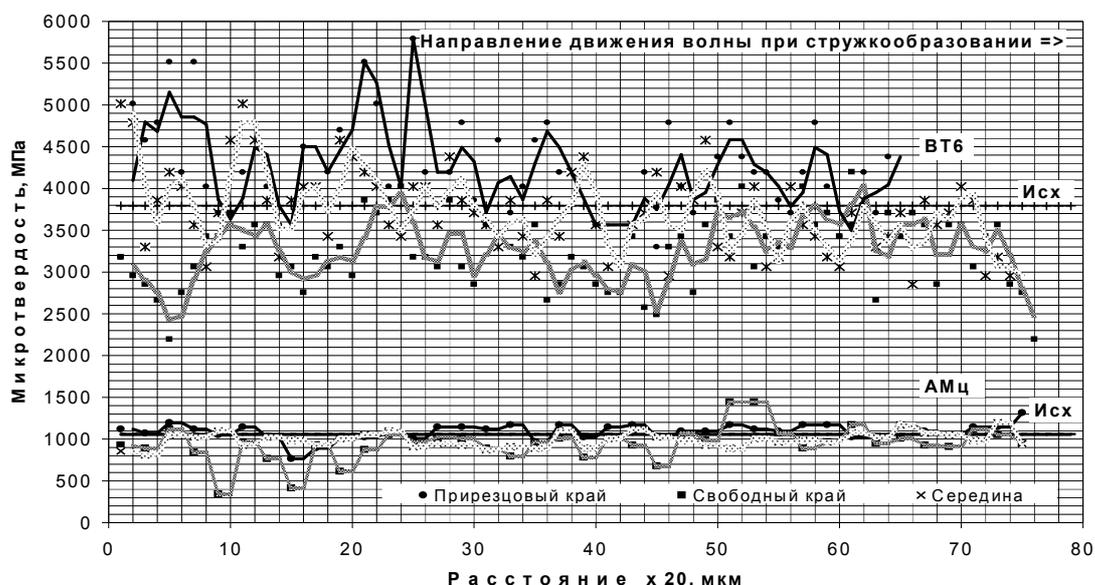


Рис. 7. Результаты измерения микротвёрдости материала стружки из сплавов ВТ23 и АМц вдоль направления движения резца

ские сдвиги вдоль границ образованных мезо- объёмов, что приводило к интенсивному выделению тепла во время отражения волны разгрузки от свободной поверхности заготовки, разупрочнению материала, особенно вблизи поверхности заготовки (свободного края). При этом формировалась *стружка локального сдвига*. Подключение новых мод пластической деформации значительно затрудняло достижение исчерпания пластичности, необходимого для разрушения материала при ударном нагружении.

В четвёртой главе представлены результаты исследования структурных и фазовых превращений в заготовках после скоростной механической обработки.

Как показали результаты проведенных исследований, в сплаве на основе алюминия АМц, структура в исходном состоянии представляла собой равноосные зерна

с магрансодержащими включениями $MnAl_6$, рис. 8,а. В процессе лезвийной обработки формировалась ориентированная *параллельно направлению резания* ячеистая дислокационная структура с поперечным размером ячеек $0,15 \dots 0,2$ мкм, рис. 8,б.

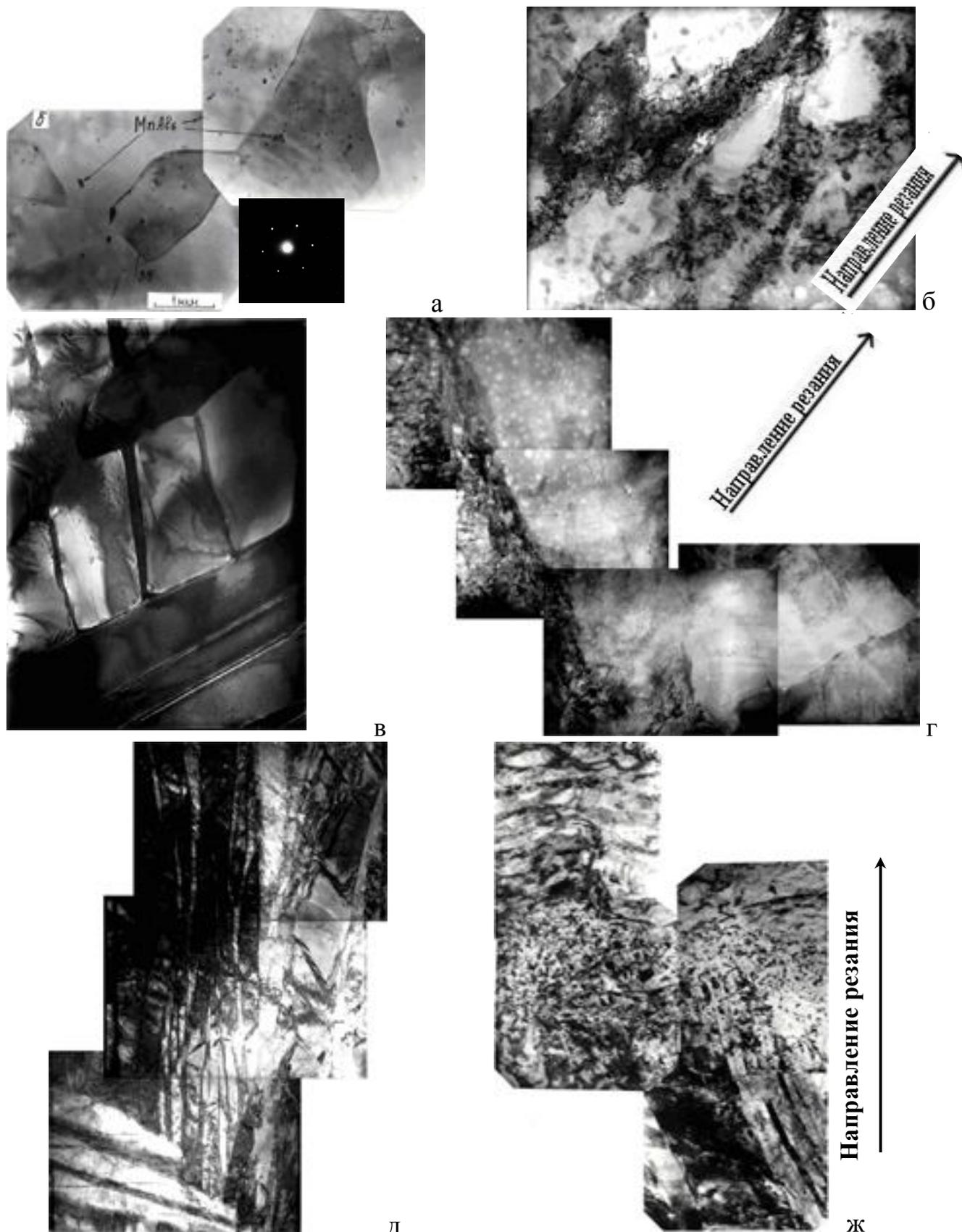


Рис. 8. Электронномикроскопические изображения материала стружек из АМц (а, б), ВТ5 (в, г) и ВТ23(д,ж) до (а,в,д) и после лезвийной обработки со скоростями 230 (б), 1(г) и 60 (ж) м/мин. $\times 24000$

По микрофотографиям в ПЭМ, произвели оценку концентрации дислокаций в стружке, которая была порядка 10^{12} линий/см². Каждая дислокационная ячейка, двигаясь как самостоятельный структурный элемент, испытывая трансляционные и поворотные моды, осуществляла *продольное* течение пластической деформации.

Таким образом, стружкообразование в *легкообрабатываемых* материалах, обладающих относительно низкой прочностью и высокой теплопроводностью (интенсивным теплооттоком), развивалось при относительно *низких контактных температурах и высоких контактных напряжениях*, что обеспечивало *равномерность продольной* пластической деформации металла заготовки перед микрорезанием и *низкий износ инструмента*.

В сплавах на основе титана ВТ-5 и ВТ-23 структура в *исходном* состоянии представляла собой колонии параллельных пластин α - и β - фаз, рис. 8(в, д). При лезвийной обработке резанием, начиная уже со скорости 1 м/мин, имело место модулирование структуры за счёт формирования периодически повторяющихся мезо- объёмов шириной 200...400 мкм, вдоль границ раздела которых наблюдали распад β - фазы, рис. 8г и формирование высокопрочной наноструктуры размером 0,05...0,20 мкм, рис. 8ж. Вдоль границ раздела мезо- объёмов проходила сильная локализация пластической деформации *ориентированная перпендикулярно направлению резания* рис. 8(г,ж). Формировалась стружка *локального сдвига*, рис. 6(д-к).

Таким образом, стружкообразование в *труднообрабатываемых* материалах, обладающих относительно высокой прочностью и низкой теплопроводностью, развивалось при относительно *высоких контактных температурах и низких контактных напряжениях*, что обеспечивало протекание *поперечной* пластической деформации металла заготовки перед микрорезанием и *высокий износ инструмента*. Такие материалы были склонны к усадке стружки.

Сплавы на основе железа ХВГ и ст.45 занимали промежуточное положение по физико-механическим свойствам. В исходном состоянии высоколегированная сталь ХВГ была термообработана на легированный зернистый цементит с частицами сульфидов железа (Fe_3S_4 ; Fe_9S_8), рис. 9а. При увеличении скорости резания от 8,6 до 60 м/мин, высота и ширина сегментов стружки (ответственные за продольную и поперечную пластическую деформацию, соответственно), приблизительно были равны и увеличивались от 210 до 450...850 мкм, рис. 4. По известной классификации формировалась *суставчатая стружка*. Деформация, предшествующая микрорезанию, развивалась однородно за счёт формирования равноосных ячеистых дислокационных структур, с размером ячеек 0,15...0,30 мкм, рис. 9б. При дальнейшем увеличении скорости резания от 60 до 250 м/мин формировалась *элементная стружка*, которая формировалась при практически одинаковой высоте сегментов 440 мкм (продольной деформации) и непрерывно уменьшающейся от 370 до 270 мкм ширине сегментов (поперечной деформации). При скорости резания более 275 м/мин началось уменьшение как высоты сегментов до 400 мкм, так и их ширины до 190 мкм, рис.4. В структуре металла стружки проходила локализация пластической деформации *ориентированная перпендикулярно направлению резания*. Формировалась стружка *локального сдвига*, рис.6г. Локализация пластической деформации выражалась в модулировании структуры, то есть в периодическом формировании дислокационной ячеистой структуры двух размеров 0,30 и 0,13 мкм внутри и вдоль границ

сегментов, соответственно. Формирование вдоль границ сегментов сверхмелкой наноструктуры с размером зёрен 0,05...0,20 мкм и с повышенной микротвёрдостью, приводило к резкому *возрастанию износа инструмента*, рис.2 (линия 2).

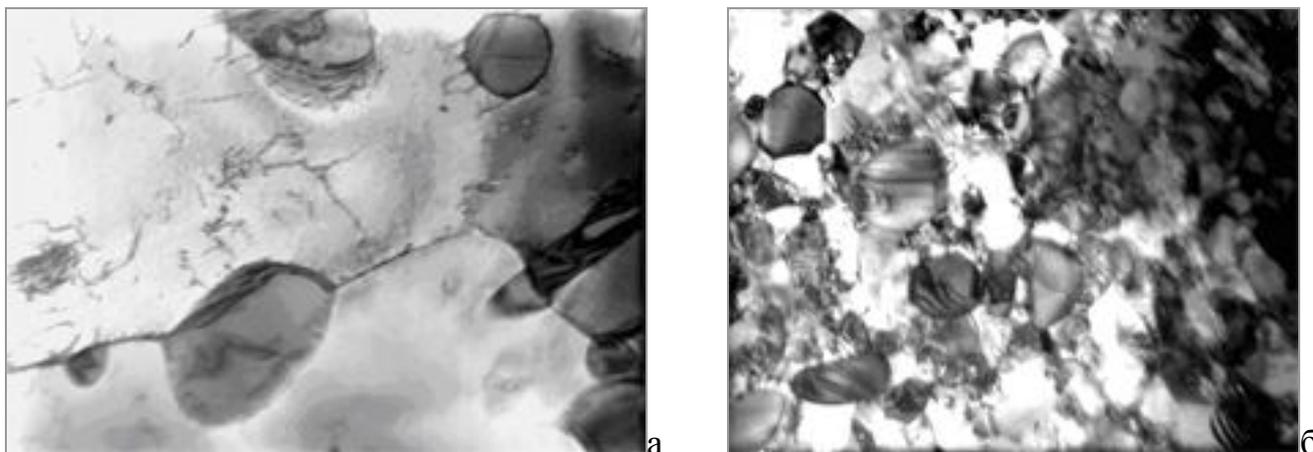


Рис. 9. Электронномикроскопические изображения материала стружек из стали ХВГ до (а) и после лезвийной обработки со скоростью 55 м/мин (б). х 39000

Присутствие частиц вторых фазовых, при различных условиях резания, существенно не изменяет морфологию стружки.

Таким образом, при скорости обработки *резанием сверх определённого уровня, интенсивность износа инструмента резко возрастает*, что связано со сменой механизма пластической деформации, её локализацией. На макро- уровне по мере торможения нарастания равномерной пластической деформации, на смену трансляционной моде приходит ротационная пластическая деформация. В металле возникают микрообъёмы, совершающие согласованный разворот относительно друг друга и вокруг направления действия максимальных касательных макро- напряжений. Ротационный механизм пластической деформации сохраняется вплоть до разрушения образца и носит локализованный характер.

При лезвийной обработке резанием титановых сплавов, начиная уже со скорости 1 м/мин, имело место модулирование структуры за счёт формирования периодически повторяющихся мезо- объёмов шириной 200...400 мкм равных ширине сегментов стружки, вдоль границ раздела которых формировались сверхмелкие высокопрочные наноструктуры с размером зёрен 0,05...0,20 мкм. Вдоль границ раздела мезо- объёмов проходила сильная локализация пластической деформации *ориентированной перпендикулярно направлению резания*, рис. 8г,ж, что приводило к локальному повышению контактных напряжений и локальному продольному пластическому оттеснению материала *труднообрабатываемой* заготовки. Формировалась стружки *локального сдвига*, рис. 6(ж-к).

Для эффективного *повышения износостойкости инструмента*, необходимо, чтобы скорость деформационного упрочнения материала в контактной зоне преобладала над скоростью динамического разупрочнения за счёт структурной и концентрационной релаксации. То есть, необходимо создавать условия, чтобы фактические контактные напряжения повышались.

В пятой главе представлены результаты исследования *пластического оттеснения предшествующего микрорезанию и построение диаграммы видов контактно-*

го взаимодействия материалов в зависимости от геометрии инструмента, контактного напряжения и скорости резания.

Процесс микрорезания при стружкообразовании рассматривался как этап достижения критической степени пластической деформации материала обрабатываемой заготовки и формирования зародышевой микротрещины. Инструмент, со свойственной ему геометрией, являлся концентратором контактных напряжений, которые возрастали с уменьшением его переднего угла.

Исследования проводили на примере сплава АМц. Механическая обработка проводилась резцом ВК8 без смазки в диапазоне скоростей резания 8...230 м/мин. Передний угол резца изменялся и составлял $\gamma = -80...+15^\circ$.

В данной работе были изучены условия продольного и поперечного отеснения металла, предшествующего микрорезанию в зависимости от приложенных контактных напряжений и геометрии инструмента. В качестве параметра, характеризующего геометрию инструмента, было выбрано отношение глубины проникновения инструмента h к радиусу закругления инструмента R и синусу переднего угла γ , – $(h / R \sin \gamma)$. Контактные сдвиговые напряжения обрабатываемого материала рассчитывались согласно соотношению: $\tau_{\text{конт}} = \alpha G b \rho^{1/2}$, где α – константа, приблизительно равная 0.3...0.5, G – модуль сдвига, и b – вектор Бюргера, ρ – плотность дислокаций.

В качестве относительного контактного сдвигового напряжения принималось отношение фактического сдвигового контактного напряжения к предельному сопротивлению материала заготовки на сдвиг, $(\tau_{\text{конт}} / \tau_{\text{мет}})$.

В данной работе показано, что *пластическое отеснение, предшествующее микрорезанию*, в контактной зоне пары трения «инструмент – обрабатываемая заготовка», в зависимости от упруго-напряжённого состояния, может быть вызвано пластической деформацией *продольной* или *поперечной* относительно направления движения режущей кромки инструмента и, соответственно, формирование клина впе-

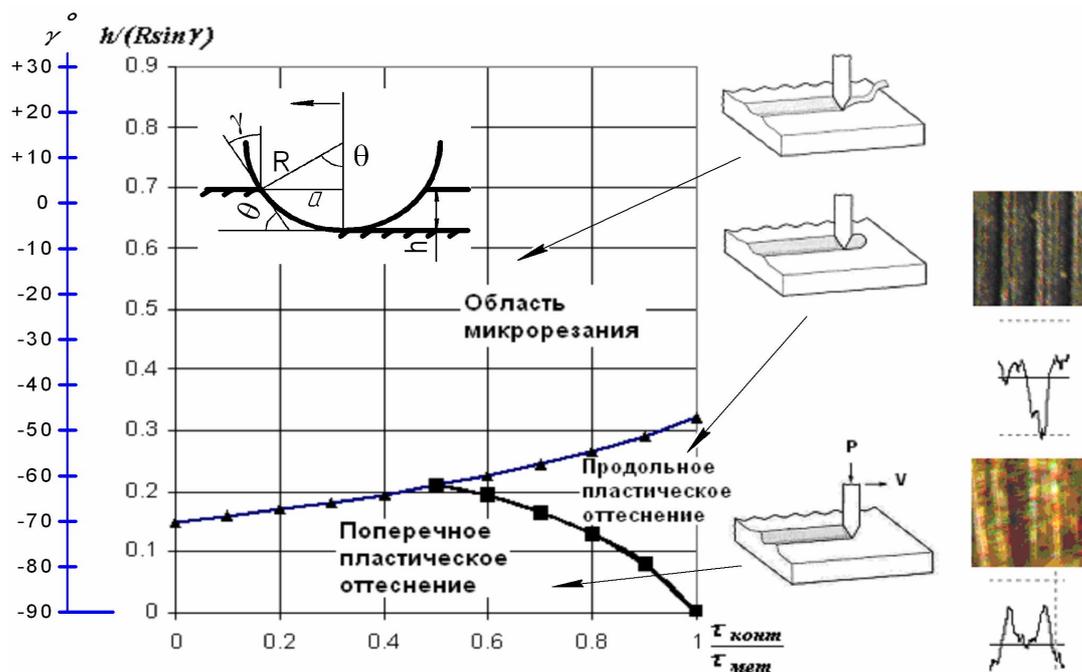


Рис. 10. Обобщённая диаграмма видов контактного взаимодействия материалов в зависимости от геометрии инструмента и приложенных относительных контактных сдвиговых напряжений

реди движущегося инструмента или поперечных навалов. Контроль профиля поверхности после пластической деформации проводили с помощью немецкого профилометра Mahr Surf PS1. Длина трассирования составляла 4,0 мм. Появление навалов по краям рисок при микрорезании свидетельствовало о прохождении перед микрорезанием *поперечной* пластической деформации.

Построена обобщённая диаграмма видов контактного взаимодействия материалов в зависимости от геометрии инструмента, приложенных контактных сдвиговых напряжений, рис.10 и скорости скольжения, рис.11.

Показано, что *поперечное* и *продольное* пластическое оттеснение наблюдались при относительно *низких* и *высоких* контактных напряжениях, соответственно. С *увеличением скорости* механической обработки вклад *поперечного* пластического оттеснения уменьшался. При этом уменьшались ширина сегментов стружек, и высота навалов по краям рисок при микрорезании.

На микро- и мезо- уровнях для своей самоорганизации, перехода к относительно равновесию, система реализует различные способы диссипации избыточной энергии: помимо превращения механической энергии в тепловую (повышения температуры в контактной зоне), протекают два многостадийных релаксационных процесса – структурный и концентрационный. Структурная релаксация в металле заготовки в изотермических условиях осуществляется за счет формирования, движения и размножения линейных дефектов кристаллического строения, то есть за счет трансляционного (сдвигового) перемещения групп атомов в виде равномерной пластической деформации по механизмам скольжения, двойникования или фазового превращения. Концентрационная релаксация проявляется в перераспределении легирующих элементов, примесных атомов и вакансий и реализуется в виде формирования сегрегатов, в проявлении вторичных структур при трении, адгезии, схватывания, наростообразования при резании.

Показано, что стружкообразование в *труднообрабатываемых* материалах, обладающих относительно высокой прочностью и низкой теплопроводностью, развивалось при относительно высоких контактных температурах и *низких контактных напряжениях* (по величине не превосходящих половину уровня предельных сдвиговых напряжений), рис.10, что обеспечивало протекание *поперечной* пластической деформации металла заготовки перед микрорезанием и *высокий износ инструмента*. Такие материалы склонны к усадке стружки.

Показано, что стружкообразование в *легкообрабатываемых* материалах, обладающих относительно низкой прочностью и высокой теплопроводностью, развива-

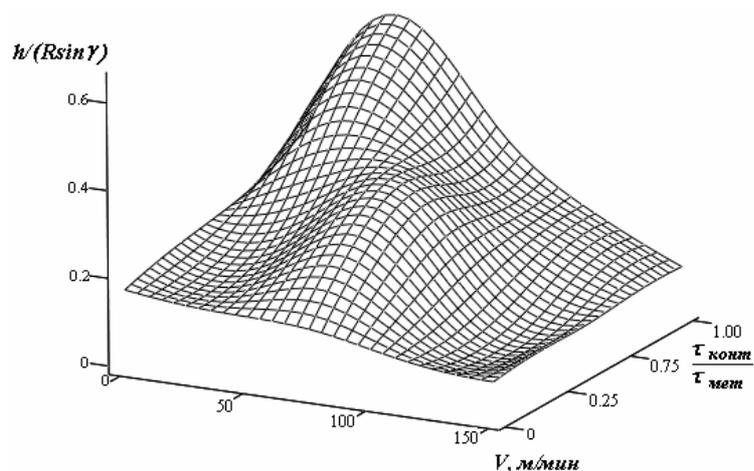


Рис. 11. Обобщённая диаграмма видов контактного взаимодействия материалов в зависимости от геометрии инструмента, приложенных контактных сдвиговых напряжений и скорости скольжения

лось при относительно низких контактных температурах и *высоких контактных напряжениях* (по величине превосходящих половину уровня предельных сдвиговых напряжений), что обеспечивало равномерность *продольной* пластической деформации металла заготовки перед микрорезанием и *низкий износ инструмента*. Такие материалы склонны к наростообразованию (задирам).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Впервые по единому целенаправленному плану получены систематические комплексные экспериментальные данные о структурно-фазовых превращениях, протекающих в контактном с инструментом объёме обрабатываемых материалов предназначенных для рабочих лопаток паровых турбин на различных структурно-масштабных уровнях.
2. Показано, что пластическое отеснение, предшествующее микрорезанию, в контактной зоне пары трения «инструмент – обрабатываемая заготовка», в зависимости от упруго-напряжённого состояния, может быть вызвано пластической деформацией *продольной* или *поперечной* относительно направления движения режущей кромки инструмента и, соответственно, формирование клина впереди движущегося инструмента или поперечных навалов.
3. Построена *обобщённая диаграмма* видов контактного взаимодействия материалов в зависимости от геометрии инструмента, приложенных относительных контактных сдвиговых напряжений и скорости механической обработки. Показано, что *поперечное* и *продольное* пластическое отеснение наблюдаются при относительно *низких* и *высоких* контактных напряжениях, соответственно. С увеличением скорости механической обработки вклад поперечного пластического отеснения уменьшался. При этом уменьшались ширина сегментов стружек и высота навалов по краям рисок при микрорезании.
4. Показано, что стружкообразование в *труднообрабатываемых* материалах, обладающих относительно высокой прочностью и низкой теплопроводностью, развивалось при относительно высоких контактных температурах и *низких контактных напряжениях* (по величине не превосходящих половину уровня предельных сдвиговых напряжений), что обеспечивало протекание *поперечной* пластической деформации металла заготовки перед микрорезанием и *высокий износ* инструмента. Такие материалы склонны к усадке стружки.
5. Показано, что стружкообразование в *легкообрабатываемых* материалах, обладающих относительно низкой прочностью и высокой теплопроводностью, развивалось при относительно низких контактных температурах и *высоких контактных напряжениях* (по величине превосходящих половину уровня предельных сдвиговых напряжений), что обеспечивало равномерность *продольной* пластической деформации металла заготовки перед микрорезанием и *низкий износ* инструмента. Такие материалы склонны к наростообразованию (задирам).
6. Установлено, что при *скорости обработки резанием сверх определённого уровня*, интенсивность износа инструмента резко возрастает, что связано со сменой механизма пластической деформации, её локализацией. На макро- уровне по мере торможения нарастания равномерной пластической деформации, на смену трансляционной моде приходит ротационная пластическая деформация. В металле

возникают микрообъёмы, совершающие согласованный разворот относительно друг друга и вокруг направления действия максимальных касательных макро-напряжений. Ротационный механизм пластической деформации сохраняется вплоть до разрушения образца и носит локализованный характер.

7. При лезвийной обработке резанием сплавов титана, начиная со скорости 1 м/мин, имело место *модулирование* структуры за счёт формирования периодически повторяющихся мезо- объёмов шириной 200...400 мкм равных ширине сегментов стружки, вдоль границ раздела которых формировались сверхмелкие высокопрочные наноструктуры размером 0,05...0,20 мкм. Вдоль этих границ проходила сильная локализация пластической деформации *ориентированная перпендикулярно направлению резани*, что приводило к локальному повышению контактных напряжений и локальному продольному пластическому оттеснению материала *труднообрабатываемой* заготовки. Формировалась стружка *локального сдвига*.
8. Рекомендовано: для эффективного *повышения износостойкости инструмента*, необходимо, чтобы скорость деформационного упрочнения материала в контактной зоне преобладала над скоростью динамического разупрочнения за счёт структурной и концентрационной релаксации. То есть, необходимо создавать условия, чтобы фактические контактные напряжения по величине превосходили половину уровня предельных сдвиговых напряжений в металле.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

1. Цветкова Г.В., Скотникова М.А., Крылов Н.А., Иванов Е.К. Структурное и фазовое состояния наплавочных материалов, предназначенных для рабочих лопаток смесителей. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование №4, 2010, СПб, С. 52-63. (Журнал из перечня изданий, рекомендованных ВАК по машиностроению).*

2. Скотникова М.А., Цветкова Г.В., Белов Ю.М., Крылов Н.А., Иванов Е.К. Особенности строения наплавочных материалов для рабочих лопаток смесителей. *Научно-производственный журнал «Металлообработка» №1(61)/2011, Издат-во «Политехника», 2011, С 37-42. (Журнал из перечня изданий, рекомендованных ВАК по машиностроению).*

3. Иванов Е.К., Скотникова М.А., Крылов Н.А. Структурно-фазовые превращения в труднообрабатываемых материалах как способ повышения износостойкости инструмента. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование №4, 2011, СПб, С. 41-53. (Журнал из перечня изданий, рекомендованных ВАК по машиностроению).*

4. Skotnikova M.A., Krylov N.A., **Ivanov E.K.** и др. Structural - phase transformation in metal of steam turbine blade of titanium alloy after high-speed processing. Abstracts «The ninth international conference on material issues in design, manufacturing and operation of nuclear power plants equipment», Saint-Petersburg, 2006, P.113.

5. Скотникова М.А., Крылов Н.А., **Иванов Е.К.** и др. Структурно-фазовые превращения в материале лопаток паровых турбин из сплава ТС5 при каплеударной эрозии. Сб. трудов «Материаловедческие проблемы при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС», СПб, 2006, С. 112-120.

6. Крылов Н. А., Ланина А.А., **Иванов Е.К.** и др. Инкубационный период развития каплеударной эрозии в лопатках паровых турбин. Сб. трудов «Физическое материаловедение», Тольятти, ОАО «АВТОВАЗ», 2006, С. 82.

7. Скотникова М.А., Ланина А.А., **Иванов Е.К.** и др. Структурно-фазовые превращения

в поверхностном слое лопатки паровой турбины при каплеударной эрозии. Сб. трудов «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов», 2007, С. 102-107.

8. Skotnikova M.A., Lanina A.A., **Ivanov E.K.** Laws of structural and phase transformations in a material blades steam turbines. The 10 International Conference «Material issues in design manufacturing and operation of nuclear power plans equipment». St-Petersburg, 2008, P. 74.

9. Скотникова М.А., Крылов Н.А., Ланина А.А., **Иванов Е.К.** Контроль напряжённо-деформированного состояния титановых полуфабрикатов по структуре и внутренним напряжениям. Сб. трудов «Диагностика оборудования и конструкций с использованием магнитной памяти металла», М. ООО «Энергодиагностика», 2009, С. 96-98.

10. Крылов Н.А., Ланина А.А., **Иванов Е.К.** Формирование структурных мезо-объёмов в титановых заготовках в процессе высокоскоростной пластической деформации. Сб. трудов XVI «Зимняя школа по механике сплошных сред», Пермь, Институт механики сплошных сред УрО РАН, 2009, С.221.

11. Skotnikova M.A., Tsvetkova G.V., **Ivanov E.K.** Structural and phase model of increase of wear resistance of overlaying welding of materials. World Conference “4 th World Tribology Congress” (WTC IV). Abstracts of the, Japan, held in Kioto, September 6-11, 2009, P. 441.

12. Крылов Н.А., Скотникова М.А., **Иванов Е.К.** и др. Влияние геоматериалов на улучшение триботехнических свойств пар трения. Сб. трудов «Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до микроуровня», ч. 2, Материалы 12-й международной научно-практической конференции, СПб. СПбГПУ, 2010, С. 508-513.

13. Скотникова М.А., Крылов Н.А., **Иванов Е.К.** Улучшение триботехнических свойств пар трения из стали 45 под влиянием геоматериалов. Сб. трудов «Высокие технологии и фундаментальные исследования», СПб, 2010, С. 257-260.

14. Skotnikova M.A., Tsvetkova G.V., Krylov N.A., Sokolov A.V., **Ivanov E.K.** Increase of Wear Resistance of Overlaying Welding Materials. Program & Abstracts. Conference Tribology and Design 2010 11-13.05.2010 - Location: Algarve, Portugal, 2010, P. 1189.

15. Скотникова М.А., Крылов Н.А., **Иванов Е.К.** Улучшение триботехнических свойств пар трения из стали 45 под влиянием геоматериалов. Сб. трудов. "Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности", СПб, 2010, С. 52-63.

16. Skotnikova M.A., Tsvetkova G.V., Krylov N.A., Sokolov A.V., **Ivanov E.K.** Nanostructural and Phase Model of Increase of Wear Resistance of Overlaying Welding Materials. Program & Abstracts. Tech Connect World Conference and Expo 2010, to be held June 21-25, 2010 in Anaheim, California, U.S.A. Nanotech, Cleantech, Microtech Joint Conferences, 2010, P. 1254.

17. Скотникова М.А., Соколов А.В., **Иванов Е.К.** Фрикционные процессы при высокоскоростной лезвийной обработке материалов. Сб. трудов «Трибология–машиностроению», ИПМаш РАН, М., С. 175-177.

18. Крылов Н.А., Скотникова М.А., **Иванов Е.К.** Влияние геоматериалов на повышение триботехнических свойств пар трения. Журнал «Станочный парк», СПб, №2, 2011, С. 64-66

19. Skotnikova M.A., Krylov N.A., **Ivanov E.K.** Formation of Rotation in Titanium Alloys at Shock Loading, 12 World Conference on Titanium. Abstracts of the Conference of the Nonferrous Metals Society of China, held in Beijing, China, June 19-24, 2011, P. 177.

20. Ильин М.И., Скотникова М.А., Ланина А.А., Крылов Н.А., Цветкова Г.В., **Иванов Е.К.** Испытательная центробежная установка ИЦУ40. Заявка на изобретение РФ. Рег. № 2009120430 от 21.05.2009.

21. Ильин М.И., Скотникова М.А., Ланина А.А., Крылов Н.А., Цветкова Г.В., **Иванов Е.К.** Испытательная центробежная установка Патент на полезную модель регистрационный № 2009132876 от 19.08.2009.