

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт математики, физики и информационных технологий

(наименование института полностью)

Кафедра «Прикладная математика и информатика»

(наименование кафедры)

01.04.02 Прикладная математика и информатика

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Математическое моделирование

(направленность (профиль)/специализация)

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Разработка математических моделей повреждаемости

поверхностного слоя деталей в процессе воздействия концентриро-

ванными потоками энергии

Студент

А.С. Селиванов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

руководитель

С.В. Талалов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель программы

д.ф.-м.н., профессор С.В. Талалов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« _____ » _____ 20 ____ г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой

к.т.н., доцент А.В. Очеповский

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« _____ » _____ 20 ____ г.

Тольятти 2018

Оглавление

Введение.....	4
ГЛАВА 1 Самоорганизация технологической системы при введении в зону обработки дополнительных потоков энергии	7
1.1 Анализ процессов структурной самоорганизации в поверхностном слое детали применительно к техническим и технологическим системам	7
1.2 Синергетический подход в моделировании повреждаемости поверхностного слоя деталей. Постановка задачи исследования	25
ГЛАВА 2 Математическая модель суммарной плотности энергии, сообщенной единице поверхностного слоя детали	31
2.1 Термодинамическое представление баланса энергии при воздействии на единицу объема поверхностного слоя	31
ГЛАВА 3 Математическая модель КИНЕТИКИ дефектообразования в поверхностном слое детали	41
3.1 Кинетические уравнения накопления плотности дислокаций в микрообъемах поверхностного слоя на примере обработки ультразвуковым выглаживанием.....	41
3.2 Кинетические уравнения структурно-фазовых превращений в поверхностном слое в результате воздействия термических циклов.....	58
ГЛАВА 4 Математическая модель формирования параметров качества поверхностного слоя детали.....	62
4.1 Математическая модель термопластической деформации поверхностного слоя	62
4.2 Математическая модель формирования микротвердости поверхностного слоя	68
4.3 Математическая модель формирования шероховатости поверхности	73
4.4 Математическая модель формирования микротвердости при ультразвуковой отделочно-упрочняющей обработки	77
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	79
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	83

Введение

В настоящее время практически во всех отраслях промышленности имеется возрастающая тенденция в создании и применении новых перспективных конструкционных и инструментальных материалов, обладающими особыми физико-механическими свойствами и высокими эксплуатационными характеристиками. Практическое использование таких материалов в современных конструкциях обусловлено технологическими возможностями их механической обработки. С технологической точки зрения материалы с особыми физико-механическими свойствами, например, такие как жаропрочные стали и сплавы, композиты, керамические материалы, специальные материалы для медицинских изделий, электроники, атомной энергетики, изделий точной оптики и др., относятся к так называемым труднообрабатываемым материалам и применение для их механической обработки традиционных технологий в большинстве случаев не оправдано.

Физическая природа механической обработки с дополнительным воздействием потоками энергии различных видов представляет собой комплекс сложных механо-физико-химических процессов, протекающих на поверхности контакта, в объеме поверхностного слоя обрабатываемой детали и в технологической жидкости [4-6]. Эти процессы, связанные с такими явлениями как упруго-пластическая деформация, трение, физико-химические превращения, адгезионные явления, перенос тепла, диссипация энергии, кавитация, волновые процессы, изнашивание и разрушение материала и т.д., оказывают существенное воздействие на обрабатываемую деталь, инструмент, технологическую жидкость и в комплексе приводят к качественно новому поведению технологической системы [7-14]. В основе комбинированных технологий механической обработки материалов в общем случае лежит проявление (на макроуровне) двух принципиально отличающихся нелинейных эффектов, связанных с трансформацией ультразвуковой энергии в обрабатываемом материале. Первый обуславливает ин-

тенсификацию разрушения объемов материала (его разупрочнение и релаксацию), второй – интенсификацию упрочнения. Исследование закономерностей проявления этих по сути «конкурирующих» эффектов на различных масштабных уровнях нелинейных сред позволяет разработать, во-первых, научные основы проектирования технологии размерной обработки труднообрабатываемых материалов с обеспечением заданных показателей качества и производительности, и, во-вторых, получить возможность эффективного повышения физико-механических свойств конструкционных материалов. Поэтому актуальным для повышения качества обработки труднообрабатываемых материалов, а в ряде случаев и исключительное обеспечение их обработки, является развитие комбинированных технологий с введением в зону обработки дополнительных источников энергии (лазера, ультразвука, плазмы и т.д.).

При моделировании процессов механической обработки резанием, шлифованием, поверхностным пластическим деформированием, в том числе и с применением дополнительных источников энергии в настоящее время используются как аналитические модели, так и численные методы конечных элементов, основанные на фундаментальных соотношениях механики сплошной среды, технологической теплофизики, механических критериях разрушения и др. В основе математических моделей, описывающих поведение материалов, лежит ряд гипотез, не учитывающих дефектную структуру материала и неоднородность ее распределения в микрообъемах. Кроме того, для описания деформационного отклика обрабатываемый материал рассматривается как некоторая идеализированная модель (жестко-пластичный, идеально-пластичный, ньютоновские жидкости и т.д.). При этом, температура и скоростная чувствительность напряжений (давлений) и деформаций либо вообще не учитывается, либо входят в модель как параметры среды. С другой стороны, успехи в области физики твердого тела, неравновесной термодинамики, физической мезомеханики позволили разработать эффективные методы анализа деформируемого ма-

териала как сложной многоуровневой иерархически организованной структуры. Однако, в большинстве случаев решение подобных задач с таким «глубоким» физическим подходом ограничивается численным получением так называемых фундаментальных характеристик (распределение полей скоростей, напряжений, деформаций, тепловых полей и т.д.). Между тем для технологий обработки важно прогнозировать получение также и качественных характеристик таких как микротвердость, остаточные напряжения, глубина дефектного слоя, структурно-фазовый состав и т.д.

Таким образом, формализация физической природы нелинейного отклика деформируемой среды в условиях высокоскоростного нагружения при механической обработке является одной из актуальных проблем физики пластической деформации и разрушения, как фундаментальной основы процессов механической обработки. Исходя из чего фундаментальной научной проблемой, на решение которой направлена работа, является анализ напряженно-деформированного состояния обрабатываемого материала как сложно-организованной дискретной структуры в условиях высокоскоростного вибрационного нагружения при комбинированной механической обработке.

Объектом исследования являются различные комбинированные технологии энергетического воздействия на среды с различной физической природы (твердые тела, жидкости и газы)

Предметом исследования являются физические модели нелинейных структурно-неоднородных сред различной природы (поликристаллические и керамические материалы, термопластичные материалы, жидкости и газообразные среды и т.д.) в условиях воздействия на них высокоинтенсивных источников энергии

ГЛАВА 1 Самоорганизация технологической системы при введении в зону обработки дополнительных потоков энергии

1.1 Анализ процессов структурной самоорганизации в поверхностном слое детали применительно к техническим и технологическим системам

Физическая природа механической обработки с дополнительным воздействием потоками энергии различных видов представляет собой комплекс сложных механо-физико-химических процессов, протекающих на поверхности контакта, в объеме поверхностного слоя обрабатываемой детали и в технологической жидкости. Эти процессы, связанные с такими явлениями как упруго-пластическая деформация, трение, физико-химические превращения, адгезионные явления, перенос тепла, диссипация энергии, кавитация, волновые процессы, изнашивание и разрушение материала и т.д., оказывают существенное воздействие на обрабатываемую деталь, инструмент, технологическую жидкость и в комплексе приводят к качественно новому поведению технологической системы. В то же время изучать отдельно влияние каждой из составляющих гибридной технологии, в частности гибридных технологий механической обработки с введением в зону обработки дополнительных потоков энергии различных видов, хотя и необходимо, но с позиций сегодняшних требований уже недостаточно. Анализ поведения гибридных технологий как системы в виду сложности совместного взаимозависимого протекания вышеперечисленных процессов, на различных масштабных уровнях и временных интервалах, возможен на основании синергетического подхода. Описание процессов комбинированной обработки с синергетических позиций позволит учесть при формировании поверхностных слоев явления самоорганизации и технологической наследственности и предложить пути оптимального управления концентрированными потоками энергии с целью создания в поверхностном слое требуемых параметров качества, отвечающим высоким эксплуатационным свойствам.

Итак, процессы комбинированной обработки представляются сложными техническими системами, в которых возможны самоорганизующиеся процессы. Самоорганизующейся системой Г. Хакен [1 – 4], основоположник теории самоорганизации, называл такую систему, которая «без специфического воздействия извне обретает какую-то пространственную, временную или функциональную структуру». При этом под «специфическим внешним воздействием» понимается такое воздействие, которое навязывает системе структуру или функционирование [4]. Автором отмечается, что для самоорганизации необходимо неспецифическое воздействие на систему. Описание поведения сложных систем возможно на основе синергетического подхода.

Термин «синергетика» как название нового междисциплинарного направления исследований впервые был введен Г. Хакеном в 1969 г. [1, 4]. В понимании Г. Хакена синергетика - это своего рода язык, на котором удобно и естественно описывать поведение сложных систем и, в частности, явление самоорганизации – возможность образовывать пространственные, временные или функциональные структуры. Для описания процессов самоорганизации предполагается, что на рассматриваемую систему наложены внешние связи, например определенное количество энергии сообщенной системе [2]. При изменении этого управляющего параметра в системе может возникнуть неустойчивость, и система самопроизвольно переходит в новое состояние, более устойчивое [2]. В синергетике показано, что потеря устойчивости системы, т.е. момент смены устойчивого состояния неустойчивым (так называемая «точка бифуркации», раздвоения) определяется параметрами порядка, комплексно характеризующими макроскопическую структуру системы [4]. При этом отмечается, что эти параметры порядка (макроскопические переменные) в свою очередь определяют поведение микроскопических частей системы в силу принципа подчинения. Параметры порядка и их способность подчинять себе (управлять)

микроскопические переменные системы позволяют последним «находить» свою структуру, т.е. самоорганизовываться [2, 4]. Варьирование управляющими параметрами (потоками концентрированной энергии) в широком диапазоне позволяет системе проходить через иерархию неустойчивостей (на различных масштабных уровнях) и через совокупность формирующихся при этом структур. Отметим, что изучив процессы самоорганизации в системе, можно, варьируя управляющими параметрами, т.е. потоками энергии (мощностью, концентрацией, комбинацией и т.д.) добиться формирования требуемых в эксплуатации высокопрочных структур, возможно и на наноуровне.

Современная синергетика стала признанным междисциплинарным направлением научных исследований, которое занимается изучением сложных систем, состоящих из многих элементов и взаимодействующих между собой нелинейным образом. При этом одна из задач синергетики заключается в выявлении законов самоорганизации, возникновения упорядоченности [4].

В отличие от других научных направлений, синергетика опирается на сходство математических моделей разных по своей природе систем. Синергетический подход предполагает переход от переменных или параметров состояния системы к параметрам порядка, являющимся функциями параметров состояния.

Применительно к технологическим системам обеспечения заданных параметров качества, совокупность которых можно описать многопараметрической поврежденностью поверхностного слоя, в качестве такого параметра порядка естественно выбрать плотность сообщенной поверхности детали энергии. При этом все многообразие возможных методов обработки и технологических способов внесения энергии в поверхностный слой получает естественную количественную оценку.

В научной литературе встречается сравнительно небольшое количество работ, посвященных исследованию процессов комбинированной обработки с позиции синергетики. Среди немногих можно отметить работы [5, 6, 7 - 12], в которых процессы комбинированной обработки рассматривались с позиции синергетического подхода. Анализ этих работ, с одной стороны позволил сделать вывод о перспективности исследований комбинированной обработки с позиции синергетики, а с другой, о недостаточной изученности механизмов самоорганизации и эволюции в технологических системах комбинированной обработки. Несмотря на достигнутые положительные результаты синергетического подхода к процессам комбинированной обработки, до настоящего времени отсутствует единая теория, комплексно описывающая процессы эволюции и самоорганизации в технологических системах комбинированной обработки с применением различных источников концентрированной энергии.

Для комплексного анализа комбинированной обработки с позиции синергетики необходимо рассмотреть механизмы эволюции и самоорганизации во взаимосвязанных и взаимозависимых физических процессах, сопровождающих комбинированную обработку. Структурную схему возможных физико-химических процессов, имеющих место в процессе комбинированного воздействия концентрированными потоками энергии, и их взаимосвязь можно представить следующим образом (рисунок 1.1).

Из рисунка 1.1 следует, что комплекс сложных взаимосвязанных и взаимозависимых физико-химических процессов, мгновенно протекающих в технологической системе, не позволяет выбрать какой-либо преобладающий. В связи с этим, целесообразно рассмотреть в отдельности каждый из физико-химических процессов и выявить в нем механизмы эволюции и самоорганизации, а также установить причины, их вызывающие, т.е. рассмотреть синергетику физико-химических процессов, сопровождающих комбинированную обработку.

В настоящее время с позиции синергетики достаточно убедительно рассмотрены такие сложные системы, как системы «трения и изнашивания» [13 – 20], «резания» [5, 6, 9 – 11, 21 – 24], системы «деформационных процессов» [12, 25, 26 – 33]. Учитывая то, что отмеченные системы имеют место и в процессах комбинированной обработки, то представляется целесообразным рассмотреть более подробно механизмы самоорганизации в этих системах. Такой анализ позволит выделить общие механизмы самоорганизации, свойственные для всех рассматриваемых систем, в том числе и для комбинированной обработки.

Наиболее широкое распространение с синергетических позиций получили исследования в области трения и изнашивания. Известны работы отечественных [13-20] и зарубежных [17, 34] ученых, в которых системы трения и изнашивания рассматривались с позиции синергетики. Так, в [13-22 и др.] показано, что любую трибосистему следует рассматривать как открытую неравновесную термодинамическую систему, в которой под воздействием различных потоков энергии и вещества происходит явление структурной приспособляемости контактирующих



Рисунок 1.1 – Структурная схема физико-химических процессов при комбинированной обработке

материалов в результате образования вторичных структур. Вторичные структуры необходимы для рассеяния энергии при ее переходе из зоны трения в трущиеся тела, причем рассеяние энергии должно происходить с наименьшей скоростью прироста энтропии [22]. Авторами отмечается, что для возможности прохождения самоорганизации в системе необходимо наличие более одного независимого источника диссипации энергии, в противном случае система не теряет устойчивости и процесс самоорганизации не происходит. Ими показано, что такими независимыми источниками (каналами) диссипации энергии могут быть несамопроизвольные химические реакции, инициируемые трением. Например, при исследовании изнашивания режущих инструментов с покрытиями [22] при определенной температуре на фрикционном контакте вследствие химических реакций образуются устойчивые вторичные структуры из карбидной фазы, улучшающие фрикционные свойства контакта.

Автор работы [23] при исследовании изнашивания режущего инструмента также показывает, что движущей силой самоорганизации в поверхностном слое является стремление системы трения к саморегулированию с уменьшением производства энтропии и увеличению скорости диссипации энергии, накапливаемой в системе вблизи особой точки вследствие новых каналов диссипации энергии. К таким дополнительным каналам, помимо химических реакций, автор относит деформационные и разрушающие механизмы, развивающиеся в поверхностном слое инструмента, например, такие как микроскол зерен карбидов и образование межзеренных трещин или фрагментация зерен и появление ротационной моды пластичности (за счет диффузионного переползания дислокаций). При этом регулирующим параметром, определяющим те или иные механизмы диссипации энергии, является скорость резания [23]. Автор показывает, что с увеличением скорости резания и повышением температуры происходит снижение сдвиговой устойчивости зерен, в результате чего накопление дислокаций в зернах карбидов приводит к фрагментации зерен и тем са-

мым способствует интенсификации пластического течения в поверхностных слоях. Фрагментация зерен карбидной фазы сопровождается уходом образующихся дислокаций в субграницы и уменьшением вследствие этого внутренней энергии, что позволяет поверхностным слоям инструмента накапливать энергию в процессе дальнейшей обработки, т.е. в результате повышается энергоемкость поверхностного слоя. Возрастание накапливаемой упругой энергии в зернах карбидной фазы, релаксация напряжений на стыках зерен повышают устойчивость процесса резания и обуславливают снижение интенсивности изнашивания инструмента при оптимальных скоростях резания [23]. То есть механизм самоорганизации в системе трения при оптимальных скоростях резания автор связывает с упорядочением сильно взаимодействующих дислокаций в зернах карбидов, приводящем к фрагментации зерен и появлению ротационной моды пластичности. При этом макроскопическое проявление самоорганизации автор видит в формировании сливной стружки. Наоборот, при низких скоростях резания, самоорганизация в системе связана с микросколом зерен карбидов, являющимся основным механизмом диссипации накопленной энергии. Макроскопическим проявлением такого процесса самоорганизации является формирование нароста [23]. Еще один механизм самоорганизации при резании автор связывает с формированием мелкодисперсных структур в поверхностных слоях режущего инструмента.

И.С. Гершман и Н.А. Буше [14] связывают самоорганизацию системы трения либо с образованием вторичных структур, либо с развитием схватывания контактирующих материалов. Авторы отмечают, что устойчивость трибосистемы определяется ее возможностью образовывать вторичные структуры. Если система трения не способна образовывать вторичные структуры, то развивается процесс схватывания. Авторы полагают, что «...схватывание также является самоорганизующимся процессом, адаптирующим систему трения к внешнему воздействию, с помощью которого трибосистема как бы стремится «прекратить» процесс трения».

Оценивать процессы самоорганизации в трибосистемах авторы предлагают с помощью так называемых управляющих параметров, введенных Ю. Климонтовичем [35], которые характеризуются тем, что при превышении ими некоторого критического значения в системе происходят процессы самоорганизации. По мнению автора работы [34], в системе трения таким управляющим параметром является относительная скорость скольжения, приводящая систему трения в неравновесное положение. В работе [14] управляющим параметром считают силу трения. Таким образом, авторы [14, 34] полагают, что регулируемыми параметрами самоорганизующегося процесса являются внешние условия воздействия на трибосистему.

В работе [16] при рассмотрении узлов трения как неравновесных диссипативных систем предложено считать управляющими параметрами внутренние динамические структуры, образующиеся в процессе трения. Авторы полагают, что устойчивое состояние системы трения при определенных внешних воздействиях должно поддерживаться за счет сохранения и воспроизводства динамических структур, выполняющие роль регулирующих элементов. При этом отмечается, что как только узел трения теряет способность воспроизводить такие структуры, он становится динамически неустойчивым и разрушается вследствие повышенной интенсивности изнашивания. По мнению авторов, самоорганизация в процессе трения осуществляется в случае, когда образование диссипативных трибоструктур происходит с дополнительным энергетическим выигрышем. Авторы поясняют такое условие самоорганизации следующими рассуждениями. С энергетической точки зрения система трения схематично ими представлена в виде модели с двумя уровнями энергии E_1 и E_2 (рисунок 1.2). При трении в процессе приработки происходит интенсивное разрушение исходных равновесных структур, и система переходит в состояние с уровнем энергии E_1 . При этом возникают новые структуры, обладающие более высокими антифрикционными свойствами, но не устойчивые. Это состояние с уровнем энергии E_1 в процессе самоорганизации может смениться более

устойчивым с уровнем энергии E_2 за счет образования энергетически выигрышных диссипативных трибоструктур.

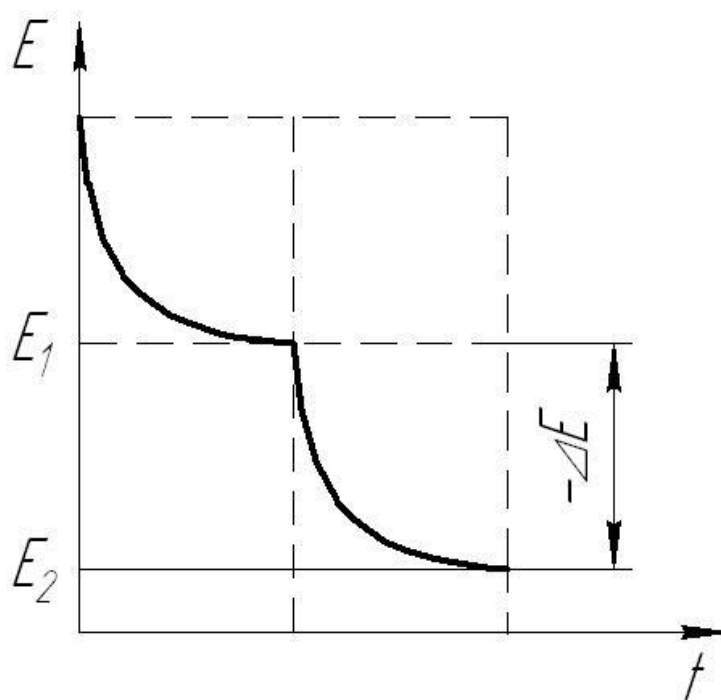


Рисунок 1.2 – Изменение энергии при самоорганизации трибоструктур в процессе трения [16]

Г. Польцер и В. Эбелинг [17] под самоорганизацией понимают необратимый процесс, который по средствам кооперативного воздействия дискретных систем ведет к образованию комплексных структур в этих системах. При этом, авторы отмечают, что для возможности самоорганизации в открытых системах должен произойти переход в критическое состояние, т.е. самоорганизация является «закритическим явлением», при котором система должна перейти критический уровень исходного состояния, прежде чем начнется диссипативная самоорганизация.

М.Л. Хейфец в работах [5, 6, 9] применительно к процессам комбинированной обработки представляет технологическую систему открытой в основном для тепловых и механических потоков энергии. Для возможности осуществления эволюционных и самоорганизующихся процессов в технологической системе автор полагает, что избыток подводимой энер-

гии, сверх определенного предела, в границах которого система поддерживает динамическое равновесие, должен иметь возможность рассеиваться, поглощаться за счет дополнительных степеней свободы (каналов диссипации) у элементов системы. При этом, дополнительные степени свободы автор представлял в перемещениях, вращениях или других движениях рабочего тела инструмента и обрабатываемого материала, а также в наличие дополнительных структур, фаз, поглощающих избыток энергии.

В работе [9] М.Л. Хейфец рассмотрел некоторые закономерности эволюции кооперативных процессов, происходящих при резании в зоне стружкообразования, на основании которых показал возможные механизмы самоорганизации системы «резание» при увеличении скорости резания.

По его мнению, в процессе резания на малых скоростях движение опережающей трещины скольжения сопровождается образованием частиц материала произвольных формы и размеров (рисунок 1.3 а) вследствие его разрыхления. Оказываясь в зоне проскальзывания и испытывая давление со стороны сжимающих бортов трещины скольжения, частицы приобретают вращательное движение.

Если частицы выстраиваются в цепочку, то, как полагает М.Л. Хейфец, потенциальная энергия трибоконтакта будет минимальной, а процесс резания устойчивым. В случае увеличения скорости резания и повышения температуры, частицы самопроизвольно выстраиваются в плотные скопления и образуют суставчатую стружку (рисунок 1.3 б).

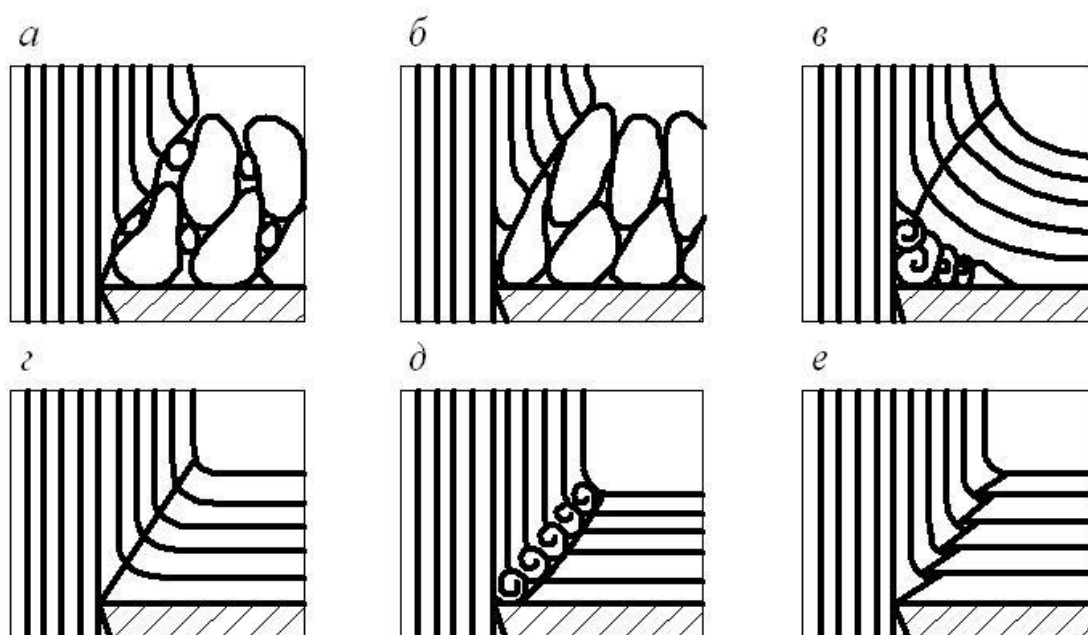


Рисунок 1.3 – Схемы эволюции структур в процессах резания и трения: а – хрупкое разрушение материала опережающей трещиной; б – контактирование частиц разрушения; в – вихревое формирование застойных структур; г – устойчивое течение материала; д – волновое образование складок; е – расслоение материала адиабатическими сдвигами [9].

При дальнейшем увеличении температуры нарушается термодинамическое равновесие в зоне резания, что приводит к прогибам условной плоскости стружкообразования и формированию в результате этого вихревых структур у режущей кромки. Термодинамическое упрочнение таких структур пластичного обрабатываемого материала ведет к образованию диссипативных застойных структур в виде наростов на передней поверхности режущего лезвия инструмента (рисунок 1.3 в). Дальнейший рост скорости резания не дает возможности заторможенным объемам обрабатываемого материала закрепиться у режущей кромки и обеспечить устойчивое течение потока сливной стружки (рисунок 1.3 г). При высоких скоростях резания пластическое течение образует складки на свободной поверхности обрабатываемого материала, которые приводят к завихрениям потока и могут формировать вихреподобные структуры уплотненного ма-

териала в зоне, предшествующей условной плоскости стружкообразования (рисунок 1.3 д). Структуры, образующиеся при увеличении давления вблизи условной плоскости скольжения, могут расслаивать обрабатываемый материал. Цикл неустойчивого скольжения по вновь образованным плоскостям скольжения завершает завихрение течения, которое формирует участок ступенчатой стружки, отделенной от другого участка локализованной зоной адиабатического сдвига. Затем рассмотренный цикл повторяется многократно, в результате чего происходит циклическое образование ступенчатой стружки.

Рассмотренные кооперативные процессы, как отмечает М.Л. Хейфец, являются внутренними регуляторами структур, формирующихся в зоне стружкообразования и на контактных площадках инструмента, осуществляющими самоорганизацию в термомеханической системе резания-трения.

На основании проведенных исследований, М.Л. Хейфец делает вывод, что «с позиции самоорганизации механических и тепловых процессов, совместных действий, происходящих в обрабатываемом материале и инструменте, на основании синергетического подхода к системе «инструмент – технологическая среда – деталь» целесообразно: интенсифицировать механическую обработку целенаправленным воздействием на зоны контакта и деформации в обрабатываемом материале и инструменте; воздействовать на зону стружкообразования со стороны срезаемого слоя в наиболее удаленных от контактных площадок местах концентрированными потоками энергии; использовать инструмент с дополнительной степенью свободы режущего лезвия: самозатачивающиеся абразивные, лезвийные с упругими демпфирующими элементами; самовращающиеся ротационные и другие; сочетать преимущества скоростного и силового резания, оптимизировать соотношения составляющих режима резания, увеличивать подачу».

Авторы работы [25], изучая деформацию приповерхностных слоев при трении, приходят к выводу, что механизм самоорганизации деформационных процессов при трении возможен при смене механизма деформа-

ции с деструкции на диффузионно-дислокационный механизм. Причем, как отмечается, оба механизма являются основными механизмами диссипации подводимой механической энергии, т.е. являются приспособительными.

Рассматривая типичную схему дефектности приповерхностного слоя, деформированного единичным элементарным контактом (рисунок 1.4), авторы [25] показывают два возможных механизма эволюции трибоконтакта: либо дислокационная стенка 2 остается неподвижной и, в результате накопления критической плотности дислокаций в скоплении 1, заблокированные стенкой, образуется микротрещина (процесс деструкции), либо в результате диффузионного переползания дислокаций в стенке под действием осмотической силы, созданной активированными молекулами 3 смазочного материала II, произойдет «разблокировка» дислокаций без нарушения сплошности.

Причем, как замечают авторы, механизм диффузионного переползания дислокаций является самоорганизующимся и возможен только при достижении определенной концентрации вакансий, т.е. регулирующим параметром процесса является концентрация вакансий. Аналогично деформированию поверхностного слоя единичным микровыступом при трении можно рассмотреть механизм деформирования поверхностного слоя индентором при обработке поверхностным пластическим деформированием и выявить при этом возможные механизмы самоорганизации. Я.И. Барац [36] в результате теплофизического анализа отделочно-упрочняющей обработки, показал, что при определенных температурах при ППД, близких к температурам фазовых переходов, возможно проявления эффекта сверхпластичности в очаге деформации. На основании выполненных исследований автор предположил, что эффект сверхпластичности при ППД можно извлечь путем оптимального сочетания размеров зон упругой и пластической деформации и созданием благоприятной тепловой обстановки в контакте инструмента и обрабатываемой поверхности.

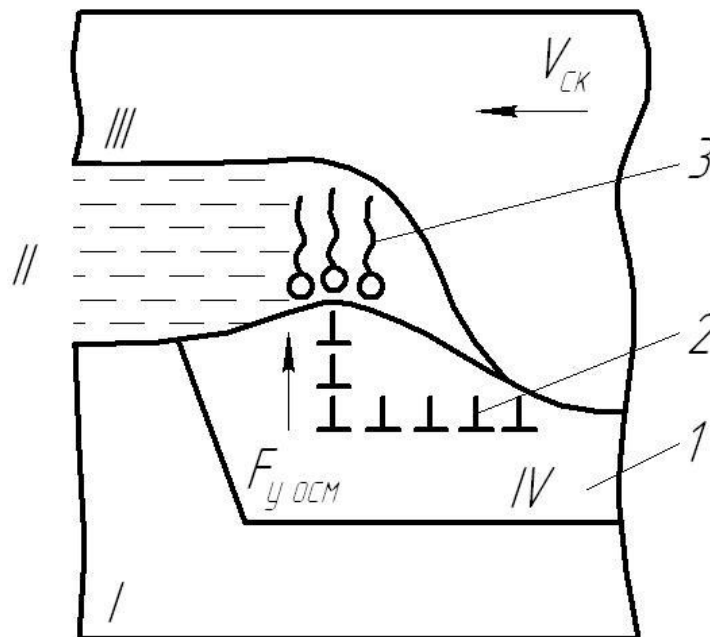


Рисунок 1.4 – Схема единичного трибоконтакта, иллюстрирующая самоорганизацию деформационных процессов: *I* – пластичный материал; *II* – смазочный материал; *III* – стальное контртело; *IV* – область материала, подвергшаяся деформации; 1 – дислокационное скопление; 2 – дислокационная стенка; 3 – активные молекулы [25]

К сожалению, дальнейшее развитие исследования эффекта сверхпластичности при ППД, судя по анализу работ в этой области, не получило. Между тем, данный эффект отвечает признакам самоорганизующегося процесса.

Дело в том, что основным механизмом сверхпластичности, по мнению С.А. Полякова, являются зернограничное проскальзывание (ротационная мода пластичности), осуществляющееся благодаря интенсивному переползанию зернограничных дислокаций, внутризеренному скольжению и диффузионной пластичности [25]. Причем, как отмечено в [12], механизм диффузионного переползания дислокаций является приспособительным, самоорганизующимся процессом, обеспечивающим «рассасывание»

плоских дислокационных скоплений и увеличивающим резерв пластичности. Стоит также отметить [12, 26, 37], что диффузионное переползание дислокаций возможно при достижении в поверхностном слое определенной концентрации вакансий, поэтому сверхпластичность возникает только при достаточном уровне нагрева, что обеспечивает необходимую концентрацию вакансий.

Н.В. Талантов [11] связывает процесс самоорганизации в зоне стружкообразования при обычном резании с потерей термодинамической устойчивости в зоне резания в результате превышения интенсивности температурного разупрочнения над интенсивностью деформационного упрочнения. При этом, по мнению автора, регулирующим параметром самоорганизации является скорость резания. Автор отмечает, что как только величина скорости резания превышает предельное значение V_{np} , на конечной границе зоны стружкообразования зарождаются условия превышения интенсивности температурного разупрочнения над интенсивностью деформационного упрочнения. При таких условиях зона стружкообразования теряет термодинамическую устойчивость и начинает поворачиваться в сторону увеличения угла сдвига β . При этом скорость поворота зоны стружкообразования, равная разности скорости резания и скорости перемещения набегающих объемов металла $V - V_z$, определяется по принципу саморегулирования и формирует на конечной границе поворачивающийся зоны стружкообразования температуры, обеспечивающие термодинамическое равновесие. В момент достижения углом сдвига значения $\beta = \pi / 4$ начинается фаза сжатия, что приводит к снижению интенсивности тепловыделения в зоне резания, вследствие чего линия действия максимальных касательных напряжений разворачивается в сторону уменьшения угла сдвига β . Образование циклических стружек сопровождается колебаниями не только значений угла β , но и величины сил, температур, напряжений на контактных площадках, скоростей перемещения стружки V_c относительно передней поверхности инструмента. Таким образом, процесс самоорганизации

при обычном резании кинематически можно описать как пульсирование скорости схода стружки V_c . Динамически самоорганизацию можно представить как колебания силы резания.

В.Я. Коршунов [24], рассматривая на основе принципов синергетики и термодинамики процессы механической обработки шлифованием, точением и поверхностным пластическим деформированием, также отмечает, что пара «деталь – инструмент» представляется открытой неравновесной диссипативной системой, свободно обменивающейся с окружающей средой энергией и массой. При этом отмечается, что формирование новой структуры обрабатываемого материала в процессе резания происходит вследствие самоорганизации. Причем, основное условие для ее осуществления автор видит в наличие качественного скачка при достижении в процессе эволюции критических значений параметров системы (напряжения, температуры, количества накопленной внутренней и тепловой энергии). При этом указывается, что эволюция в системе сопровождается конкуренцией двух противоположных, взаимосвязанных и одновременно протекающих тенденций – роста плотности упругой энергии различного рода дефектов (вакансий, дислокаций и т.д.), накапливающиеся в материале за счет работы сил резания, и ее высвобождения за счет релаксационных процессов, протекающих внутри деформированного объема. То есть самоорганизация возможна в условиях конкуренции двух и более одновременно и кооперативно протекающих физических процессов.

В работе [8] показано, что процесс самоорганизации структур в объеме материала ПС, облучаемого лазером, связан с локализацией возникновения диссипативных структур в результате формирования при лазерной обработке дальнедействующих полей напряжений. На основании проведенных исследований авторами доказано возникновение сложнодеформированных дислокационных диссипативных структур в результате локализации пластической деформации при лазерной обработке. Кроме этого, отмечается, что структурной самоорганизации ПС способствует характер

оплавленной зоны. Показано, что последняя характеризуется высокой степенью неравновесности жидкой фазы, бифурационной неустойчивостью расплава и переходом ламинарного течения жидкости (расплавленного металла) к турбулентному. В результате таких созданных высоких температурных и концентрационных градиентов в облучаемых объемах ПС формирующиеся вихри обеспечивают, по мнению авторов, диссипацию энергии, аномальные потоки массопереноса и диспергирование растущих кристаллов. Регулирующими параметрами структурной самоорганизации авторы считают внутренние поля напряжений, незавершенность гомогенизационных процессов, характер распределения примесей и легирующих элементов в растворе перед охлаждением, а также микрохимическую неоднородность вокруг источников растворения.

Таким образом, на основании проведенного анализа, можно заключить, что процессы самоорганизации в различных физических системах, в том числе и в технологических, заключаются в возможности систем, в результате структурно-фазового перехода в неустойчивое состояние под воздействием потоков энергии и вещества, самопроизвольно образовывать или воспроизводить устойчивые диссипативные структуры на различных масштабных уровнях, рассеивающие избыток подводимой извне энергии.

Причем для осуществления самоорганизации необходимы следующие условия:

- 1) система должна быть термодинамически открытой и обмениваться энергией и веществом с окружающей средой;
- 2) в системе все процессы при структурно – фазовом переходе должны происходить согласованно (кооперативно) на различных масштабных уровнях;
- 3) переход в системе из неустойчивого состояния в устойчивое в процессе самоорганизации может происходить при достижении критических параметров структурно-фазового состояния на различных масштабных уровнях.

1.2 Синергетический подход в моделировании повреждаемости поверхностного слоя деталей. Постановка задачи исследования

С точки зрения синергетики основным объектом воздействия потоками энергии в технологической системе комбинированной обработки является поверхностный слой (ПС). При этом, технологическая система комбинированной обработки рассматривается как открытая термодинамическая система, в которой непрерывно проходят потоки энергии и вещества в ПС и окружающей среде. Результатом протекания потока энергии через поверхностный слой, является его самоорганизация с образованием диссипативных структур, рассеивающих избыток подводимой извне энергии.

Общую схему (без учета масштабных уровней и конкретизации структурно-фазовых параметров) механизмов самоорганизации и эволюции в технологической системе при комбинированной обработке можно представить в следующем виде (рисунок 1.7).

Направленное воздействие комбинированными потоками энергии (см. рисунок 1.7) на ПС с некоторыми исходными свойствами (от предшествующей обработки), в результате перераспределения потоков энергии, частичного их поглощения, рассеивания и т.д., производит в нем структурно-фазовые превращения, кооперативно протекающие на различных масштабных уровнях (эволюция ПС). В процессе эволюции, при достижении критических значений параметров структурно-фазового состояния ПС (достижение точки бифуркации и потеря устойчивости ПС), самопроизвольно происходят самоорганизующиеся процессы с образованием устойчивых диссипативных структур, способных рассеивать избыток энергии.

Важнейшим элементом синергетики является понятие параметра порядка, значение которого определяет результат самоорганизации системы. При описании самоорганизации поверхностного слоя при введении дополнительных источников энергии, в том числе и при гибридных технологиях мехобработки, в качестве параметра порядка, регулирующего состояние поверхностного слоя, выступает суммарная плотность энергии, сооб-

щенной единице поверхностного слоя всеми действующими при обработке источниками.

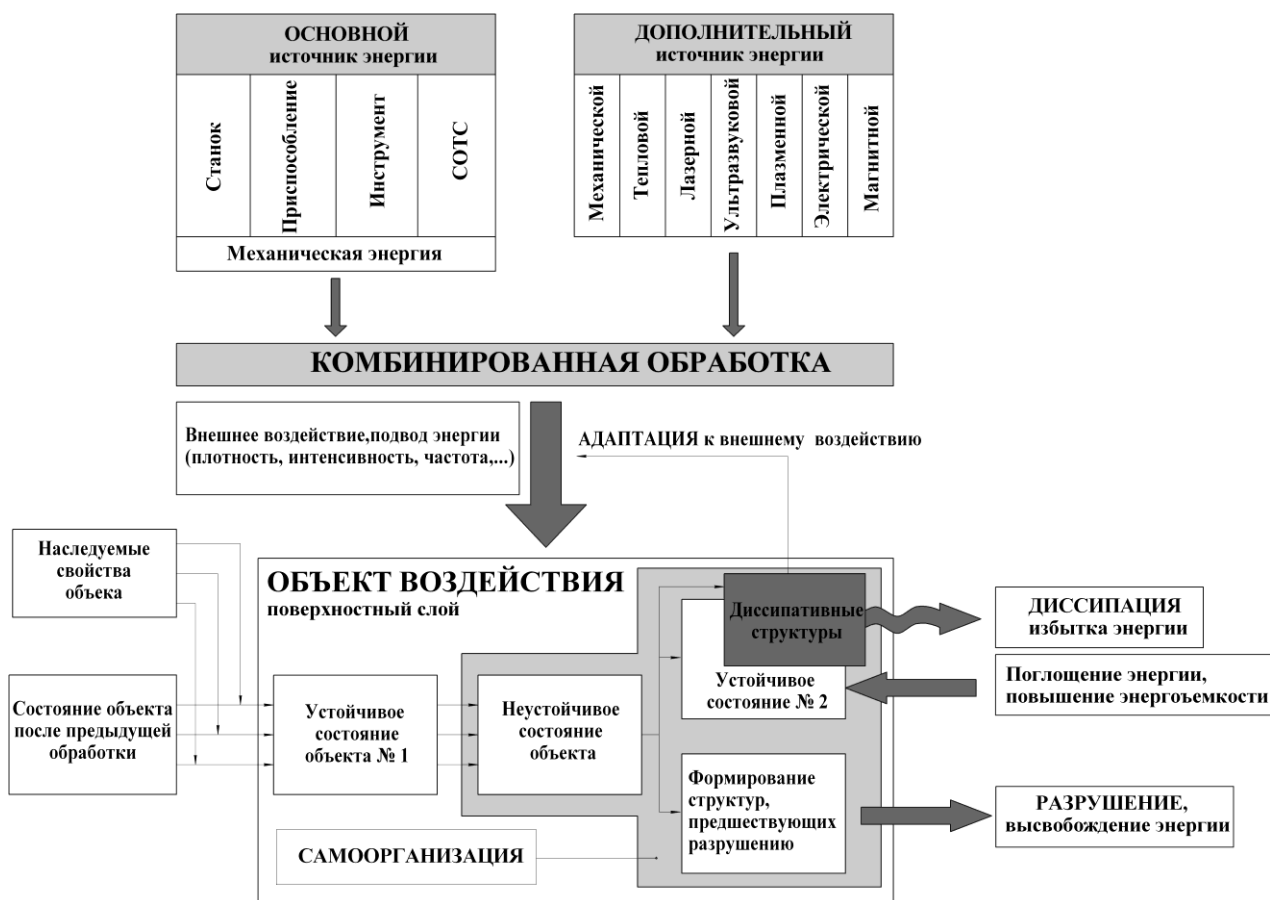


Рисунок 1.7 – Схема самоорганизации в технологической системе при дополнительном воздействии концентрированными потоками энергии

В энергетической интерпретации структурно-фазовую самоорганизацию ПС в процессе комбинированной механической обработки в процессе можно представить следующим образом (рисунок 1.8).

В результате целенаправленного внешнего воздействия различных потоков энергии в процессе комбинированной мехобработки в ПС одновременно происходят два конкурирующих процесса – рассеивание (диссипация) энергии и ее накопление за счет изменения внутренней структуры ПС (увеличения плотности дислокаций, изменения фазового состава, образования вакансий, и т.д.), т.е. развития дефектности (поврежденности) ПС и накопления внутренней (скрытой) энергии. При достижении предельно-

го, или критического, уровня внутренней энергии (на рисунок 1.78 уровень энергии U_{npI}) для данного типа структур (на рисунок структура I), структурные элементы ПС самопроизвольно и согласованно перераспределяются таким образом, что вновь образованная структура (II) отвечает меньшему уровню запасенной внутренней энергии (на рисунок – точка A), но с большей энергоемкостью. Дальнейшее воздействие на систему приводит к эволюции структуры II и, соответственно, к накоплению внутренней энергии, при достижении которой критического уровня U_{npII} происходит самоорганизация внутренних структур II с образованием новой структуры III.

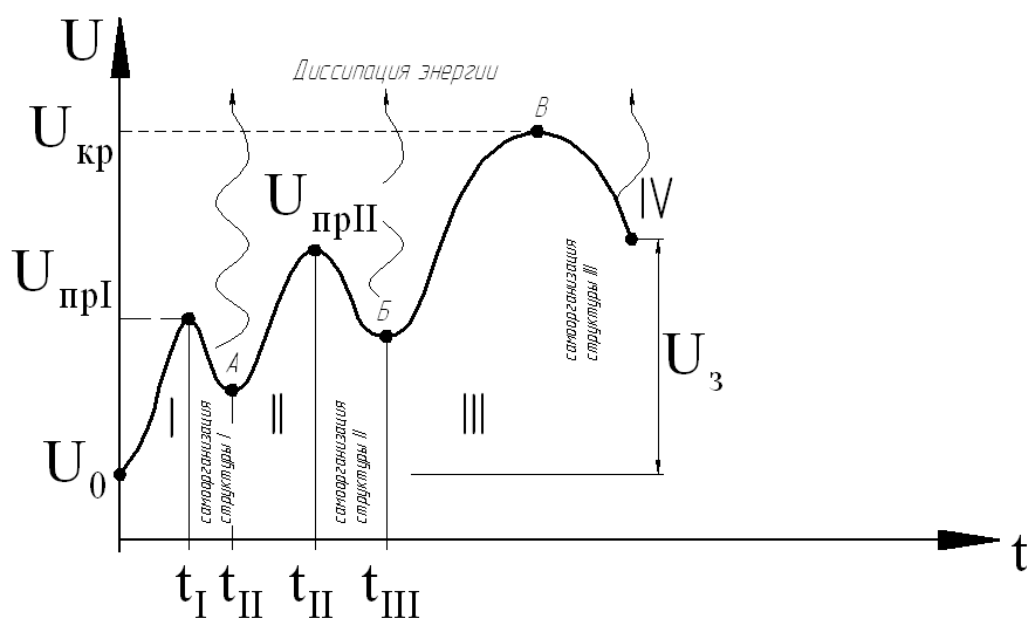


Рисунок 1.8 Схема внутренней структурно-энергетической эволюции и самоорганизации технологической системы при комбинированной механической обработке

Неоспоримые преимущества синергетики как методологии, наиболее успешно описывающей качество поверхностного слоя, т. е. спектр его возможных состояний в результате технологических воздействий, проявляются при решении прикладных задач оптимизации условий обработки. Традиционный подход к оптимизации состоит в построении многомерных функций, описывающих тот или иной параметр качества в зависимости от всего множества исходных параметров обработки, подлежащих выбору.

При исследовании процессов механической обработки с введением дополнительного энергетического воздействия синергетика позволит значительно упростить процедуру оптимизации, заменяя многомерную оптимизацию одномерной по параметру порядка, что открывает путь для построения шкал технологической повреждаемости, введения простой системы нормирования качества поверхностного слоя и разработки эффективных систем управления качеством обработки. Это определяет необходимость использования синергетического подхода к исследованию процессов комбинированной обработки металлических и керамических материалов при определенных техническим заданием видах механической обработки – шлифовании, правке абразивных кругов и поверхностно – пластического деформирования.

Структурная схема анализа самоорганизации поверхностного слоя при введении дополнительных источников энергии представлена на рисунке 1.9.



Рисунок 1.9 – Структурная схема анализа самоорганизации поверхностного слоя при введении дополнительных источников энергии

1.3 Выводы

1. Процесс комбинированной обработки с дополнительным воздействием концентрированными потоками энергии является сложной энергетической системой, в которой на различных масштабных уровнях происходит трансформация потоков энергии, их поглощение и диссипация, способствующая при этом формированию структур, отвечающим признакам самоорганизации.
2. Самоорганизация в технологической системе комбинированной обработки проходит по следующей схеме: в результате внешнего воздействия (управляющих параметров) система теряет устойчивость и переходит в неустойчивое состояние, в котором, при достижении критических значений параметров порядка, комплексно описывающих макроскопиче-

скую структуру системы, последняя самопроизвольно переходит в новое устойчивое состояние. В энергетической интерпретации процессов комбинированной обработки в качестве управляющего параметра целесообразно принять количество энергии, сообщенной объекту воздействия (т.е. внешний энергетический поток), а в качестве параметра порядка – плотность накапливаемой в объекте воздействия внутренней энергии. Под объектом воздействия подразумевается поверхностный слой.

3. Исследования процессов самоорганизации в технологической системе комбинированной обработки позволяет при варьировании управляющими параметрами, т.е. потоками энергии (мощностью, концентрацией, комбинацией видов) добиваться формирования требуемых в эксплуатации высокопрочных структур, в том числе и на наноуровне.

4. Особенности дополнительного энергетического воздействия на инструмент, заготовку или технологическую среду при механической обработке способствуют снижению физико-механических характеристик обрабатываемого материала, действию комплекса эффектов, таких как кавитация, эрозия, диффузия и др. Это соответствующим образом создает условия самоорганизации процессов, происходящих в поверхностном слое

5. С точки зрения самоорганизации (синергетики) основной объект технологической теории качества обработки – поверхностный слой, является открытой термодинамической системой, через которую проходит поток энергии от технологических воздействий. Результатом протекания потока энергии через диссипативную систему – поверхностный слой, является его самоорганизация, в данном случае – появление новых структур поверхностного слоя: новых металлургических фаз, механических напряжений, трещин, оплавления поверхности, изменения ее шероховатости и т.д.

6. Преимущества синергетики как методологии, успешно описывающей качество поверхностного слоя, т.е. спектр его возможных состояний в результате технологических воздействий, проявляются при решении прикладных задач оптимизации условий обработки.

ГЛАВА 2 Математическая модель суммарной плотности энергии, сообщенной единице поверхностного слоя детали

2.1 Термодинамическое представление баланса энергии при воздействии на единицу объема поверхностного слоя

Физическая природа механической обработки с дополнительным воздействием потоками энергии различных видов представляет собой комплекс сложных механо-физико-химических процессов, протекающих на поверхности контакта, в объеме поверхностного слоя обрабатываемой детали и в технологической жидкости [38, 39]. Анализ поведения комбинированных технологий как системы в виду сложности совместного взаимозависимого протекания вышеперечисленных процессов, на различных масштабных уровнях и временных интервалах, возможен на основании синергетического подхода [39]. Описание процессов комбинированной обработки с синергетических позиций позволит учесть при формировании поверхностных слоев явления самоорганизации и технологической наследственности и предложить пути оптимального управления концентрированными потоками энергии с целью создания в поверхностном слое требуемых параметров качества, отвечающим высоким эксплуатационным свойствам [38, 39].

Традиционный подход к оптимизации состоит в построении многомерных функций, описывающих тот или иной параметр качества в зависимости от всего множества исходных параметров обработки, подлежащих выбору. При исследовании процессов механической обработки с введением дополнительного энергетического воздействия синергетика позволит значительно упростить процедуру оптимизации, на основании учета явления самоорганизации поверхностного слоя. Это определяет необходимость использования синергетического подхода к оптимизации и управлению процессами комбинированной обработки металлических и керамических материалов при определенных техническим заданием видах механической

обработки – шлифовании, правке абразивных кругов и поверхностно – пластического деформирования.

Процесс самоорганизации заключается в возможности систем, в результате структурно-фазового перехода в неустойчивое состояние под воздействием потоков энергии и вещества, самопроизвольно образовывать или воспроизводить устойчивые диссипативные структуры на различных масштабных уровнях, рассеивающие избыток подводимой извне энергии. Причем для осуществления самоорганизации, как было установлено ранее, необходимы следующие условия:

- 1) система должна быть термодинамически открытой и обмениваться энергией и веществом с окружающей средой;
- 2) в системе все процессы при структурно – фазовом переходе должны происходить согласованно (кооперативно) на различных масштабных уровнях;
- 3) переход в системе из неустойчивого состояния в устойчивое в процессе самоорганизации может происходить при достижении критических параметров структурно-фазового состояния на различных масштабных уровнях.

Таким образом, в технологической системе необходимо установить критерии самоорганизации, касающиеся физически существующих структурных параметров материала и исследовать их взаимосвязь с технологическими параметрами и условиями обработки и показателями качества поверхностного слоя.

Основным объектом воздействия потоками энергии в технологической системе комбинированной обработки является поверхностный слой. При этом, технологическая система комбинированной обработки рассматривается как открытая термодинамическая система, в которой непрерывно проходят потоки энергии и вещества в ПС и окружающей среде. Результатом протекания потока энергии через поверхностный слой, является его

самоорганизация с образованием диссипативных структур, рассеивающих избыток подводимой извне энергии.

Рассмотрим задачу о трансформации энергии в единице объема dV поверхностного слоя обрабатываемой детали, подверженной высокоэнергетическому воздействию. Рассмотрим элементарный объем находящийся на глубине h от поверхности и на который воздействует поток энергии ограниченный элементарной площадкой dS .

Трансформацию энергии в поверхностном слое, ограниченным элементарным объемом, представим в виде первого закона термодинамики [15]:

$$\frac{dA}{dt} \frac{1}{V} = \frac{dU_c}{dt} + \frac{dQ}{dt}, \quad (2.1)$$

то есть удельная мощность (или работа внешнего источника энергии в единицу времени и отнесенная к единице объема) расходуется на изменение внутренней, скрытой энергии и на изменение тепловой энергии элементарного микрообъема поверхностного слоя

Основная доля тепловой энергии (порядка 80-90 %) рассеивается в результате теплообмена q с окружающими такими же микрообъемами или с внешней средой), другая ее часть, порядка 10-20 % идет на повышение тепловой составляющей внутренней скрытой энергии dU_T , увеличивая общий уровень накопленной энергии за цикл обработки [15]. Таким образом, уравнение (2.1) можно переписать в виде:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{dU_c}{dt} + \frac{dU_T}{dt} + \frac{dq}{dt} \quad (2.2)$$

Схема термодинамического представления о трансформации внешней энергии в микрообъемах ПС приведено на рисунке. 3.1.

Для локального микрообъема тепловой поток можно представить как $dq = TdS$ [4], где S – энтропия, T – текущее значение температуры.

С учетом этого, выражение (2.2) запишем в виде:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{dU_c}{dt} + \frac{dU_T}{dt} + T \frac{dS}{dt}, \quad (2.3)$$

где dS/dt – производство энтропии.

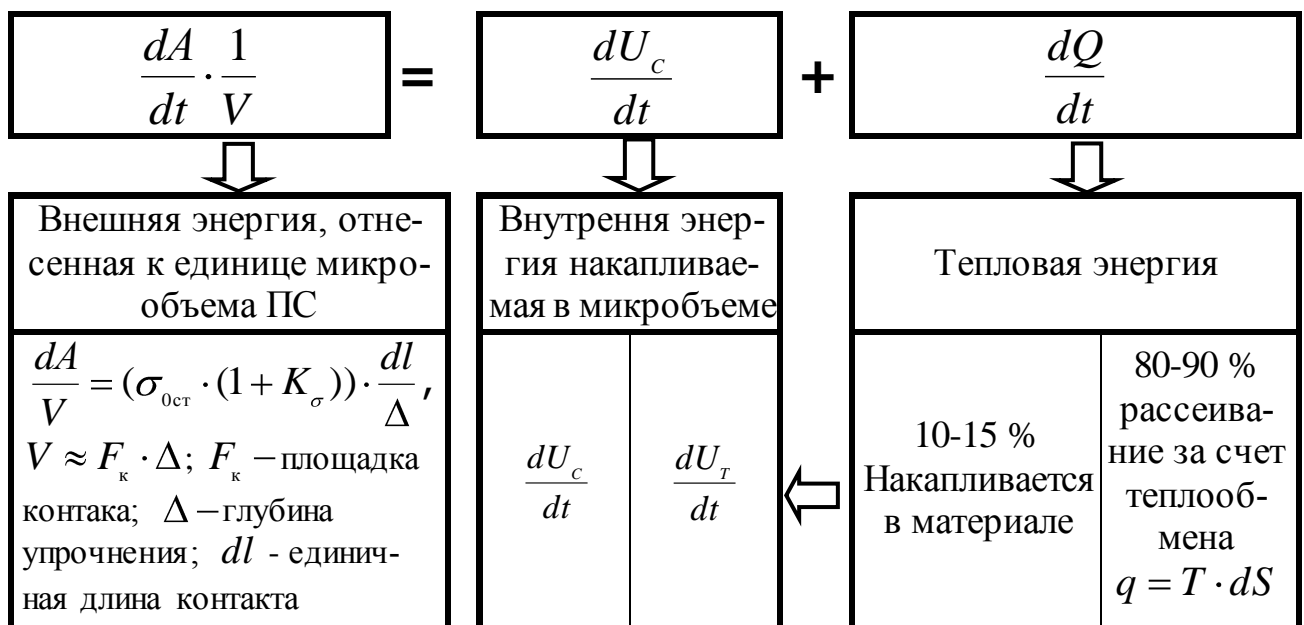


Рисунок 3.1 Термодинамическое представление процессов трансформации энергии в микрообъемах ПС

В соответствии с фундаментальной теоремой Пригожина - Гленсдорфа [6], для термодинамической системы при ее эволюции к стационарному состоянию выполняются следующие условия: $dS/dt \leq 0$ – условие эволюции; $dS/dt = 0$ – условие стационарности; $dS/dt \geq 0$ – условие устойчивости.

Преобразуем уравнение (2.3) к виду

$$\frac{dS}{dt} = \frac{1}{T} \frac{dA}{dt} - \frac{1}{T} \left(\frac{dU_c}{dt} + \frac{dU_T}{dt} \right) \quad (2.4)$$

Тогда для условия эволюции имеем

$$1 \leq \frac{dU_c}{dA} + \frac{dU_T}{dA}, \quad (2.5)$$

для условия стационарности

$$1 = \frac{dU_c}{dA} + \frac{dU_T}{dA}, \quad (2.6)$$

для условия устойчивости

$$1 \geq \frac{dU_c}{dA} + \frac{dU_T}{dA}. \quad (2.7)$$

Если представить систему «обрабатываемая поверхность – внешний источник энергии» как открытую термодинамическую систему, то необходимо обеспечить ее стремление к стационарному состоянию не за сколь долгое время (релаксация к стабильному состоянию), а за период цикла обработки. В технологическом аспекте это может соответствовать такому состоянию при котором избыток подводимой извне энергии рассеивался бы устойчивыми диссипативными структурами. Такому условию соответствует минимум производства энтропии системы и отвечает стабильному поглощению внутренней энергии в локальном микрообъеме ПС и стабильному формированию показателей качества поверхности.

В основу оптимизации комбинированной обработки с дополнительным воздействием энергии ультразвуковых колебаний может быть положено уравнение (2.6) энергетического баланса, переменные которого должны быть расписаны для конкретного частного случая обработки.

Так, например, для условий ультразвуковой упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием в уравнении (2.6) скорость изменения скрытой энергии пластической деформации $\frac{dU_c}{dt}$ связана с накоплением дефектной структуры обрабатываемого материала, например дислокаций и их взаимодействием друг с другом, а скорость изменения тепловой составляющей внутренней энергии $\frac{dU_T}{dt}$ – с энергией их движения.

Работу внешних сил, отнесенных к единичному микрообъему ПС, действующих на элементарную площадку контакта в процессе обработки с учетом дополнительного источника энергии (энергия УЗК), можно оценить следующим выражением:

$$dA = Pdl \cdot \frac{1}{V}, \quad (2.8)$$

где P – сила контактного взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью, Н; dl – единичная длина контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью, мм; V – объем поверхностного слоя, подверженного обработке, мм³.

Принимая для V соотношение $V = F_k \cdot \Delta$, где F_k – площадь контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью, Δ – толщина поверхностного слоя, в котором в процессе обработки происходят структурные изменения и формирования его новых свойств.

Тогда выражение (2.8), учитывая отношение $P/F_k = \sigma_k$, где σ_k – контактные напряжения, получим следующую формулу:

$$dA = \sigma_k \frac{dl}{\Delta}, \quad (2.9)$$

Для условия ультразвуковой обработки контактные напряжения обусловленные как статическими, так и динамическими напряжениями:

$$\sigma_k = \sigma_0 + \sigma_\xi \sin(2\pi ft), \quad (2.10)$$

где σ_0 – контактное напряжение, обусловленное статической нагрузкой, МПа; σ_ξ – амплитуда динамического напряжения (звукового давления), действующего на площадку контакта при УЗ-колебаниях, МПа;

Например, для резания сообщенная единице площади обрабатываемой поверхности детали удельная тепловая энергия равна

$$Q = \eta \frac{P_z}{s}, \quad (2.11)$$

где P_z – сила резания, s – подача на оборот, η – доля тепла, отводимого деталью.

Для шлифования сообщенная единице площади обрабатываемой поверхности детали удельная тепловая энергия равна

$$Q = \eta \frac{P_z v}{2v_1 \sqrt{2Ra}}, \quad (2.12)$$

где P_z – сила резания, v – скорость резания, v_1 – скорость подачи, R – радиус скругления поверхности шлифовального круга, a – толщина срезаемого слоя, η – доля тепла, отводимого деталью.

Для упрочнения микрошариками сообщенная единице площади обрабатываемой поверхности детали удельная тепловая энергия равна

$$Q = \eta N \tau \frac{mv^2}{2}, \quad (2.13)$$

где m - масса микрошарика, v - скорость микрошарика, τ - длительность обработки, N - поток микрошариков (штук в единицу времени на единицу площади), η - доля тепла, отводимого деталью.

Пользуясь подобного рода зависимостями легко определить положение рабочей точки операции на шкале повреждаемости, т.е. понять, возникают дефекты данного вида на данном режиме или нет.

2.2 Обобщенная модель повреждаемости поверхностного слоя при энергетическом воздействии

Анализ отдельных механизмов поврежденности, в частности, фазовых и структурных превращений, термопластических деформаций и изменения напряженного состояния поверхностного слоя, в том числе возможного образования трещин и влияния оплавления поверхности на ее шероховатость, позволяет для каждого вида поврежденности указать значение критической плотности сообщенной поверхности тепловой энергии, т. е. ввести универсальные энергетические шкалы энергетической поврежденности поверхностного слоя.

Для объяснения разработанной концепции уместно привести простую аналогию. Классическая схема анализа прочности конструкции сводится к построению зависимости

$$\sigma = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.14)$$

напряжения σ от параметров задачи x_1, x_2, \dots, x_n . В качестве этих параметров могут выступать свойства материала (модуль упругости, коэффициент Пуассона), пространственные координаты, заданные нагрузки и т.п. Фактически функция $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ вводит шкалу напряжений в материале для условий данной задачи. Вводя для данного материала предельное допустимое (разрушающее) напряжение σ_0 , делим шкалу напряжений на две части: рабочую область, где $\sigma < \sigma_0$ и область образования дефектов (разрушающих трещин), где $\sigma > \sigma_0$. Теперь работоспособность или повреждаемость конструкции зависит от положения текущего напряжения σ на шкале напряжений.

Аналогично, энергетическая поврежденность материала детали описывается введением нескольких шкал

$$Q_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.15)$$

для величины тепловой энергии, сообщенной единице площади обрабатываемой поверхности детали. Количество шкал определяется числом различных механизмов энергетической повреждаемости данного материала. Каждый механизм энергетической повреждаемости поверхностного слоя для определенного материала детали имеет свое критическое значение удельной тепловой энергии E_i , поэтому область рабочих режимов по i -му механизму повреждаемости определяется из условия $f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) < E_i$. Поскольку на данной операции необходимо обеспечить отсутствие повреждаемости по всем возможным механизмам, то областью рабочих параметров операции x_1, x_2, \dots, x_n будет пересечение (т.е. общая часть) областей параметров по всем механизмам повреждаемости материала.

Для построения энергетических шкал многопараметрической поврежденности поверхностного слоя анализ отдельных механизмов поврежденности с позиций синергетики выполнялся по единой методике, включающей следующие этапы:

- 1) построение исходных физических моделей повреждаемости одного или нескольких дифференциальных уравнений, описывающих изменение параметров состояния поверхностного слоя под действием температурного или силового полей;
- 2) переход к безразмерным величинам, в ходе которого исходные модели переписываются в терминах безразмерных комплексов (критериев), в которые группируются исходные физические величины, что приводит к уменьшению числа параметров;
- 3) численный анализ моделей при различных значениях безразмерных комплексов;
- 4) аппроксимацию результатов численных расчетов простыми аналитическими зависимостями относительно безразмерных комплексов;
- 5) постановку в эти зависимости выражений безразмерных комплексов, что дает искомые зависимости между физическими параметрами термической поврежденности поверхностного слоя и мерой энергетического воздействия;
- 6) экспериментальную проверку полученных зависимостей и идентификацию параметров поврежденности;
- 7) построение технологических критериев энергетической поврежденности поверхностного слоя при обработке по каждой операции.

ГЛАВА 3 Математическая модель КИНЕТИКИ дефектообразования в поверхностном слое детали

3.1 Кинетические уравнения накопления плотности дислокаций в микрообъемах поверхностного слоя на примере обработки ультразвуковым выглаживанием

Для определения внутренней, скрытой энергии пластической деформации и тепловой составляющей внутренней энергии необходимо получить кинетические уравнения, характеризующие изменение дефектной структуры ПС в процессе комбинированной обработки.

Рассмотрим изменение дефектной структуры поверхностного слоя на примере комбинированной обработке поверхностным пластическим деформированием - выглаживанием с наложением на инструмент энергии ультразвуковых колебаний.

Процесс механической обработки поверхностным пластическим деформированием сопровождается изменением в деформируемых микрообъемах поверхностного слоя дефектной структуры и увеличение плотности дислокаций [7]. Пластическая деформация микрообъема ПС, подверженного обработке ультразвуковым выглаживанием (УЗВ), рассмотрена на основе теории дислокаций. Полагаем, что в деформируемом микрообъеме dV (рисунок 1.2), находящимся на некоторой глубине h от поверхности и ограниченном элементарной площадкой dS , движущейся со скоростью v' в направлении выглаживающего инструмента радиусом R , внедренного в обрабатываемую поверхность на величину $h_{ст}$ и совершающего УЗК с частотой f и амплитудой ξ , рассмотрена с позиции теории дислокаций, происходят процессы накопления и аннигиляции дислокаций и связанные с этими процессами механизмы упрочнения и разупрочнения ПС и, как следствие, формирование его показателей качества.

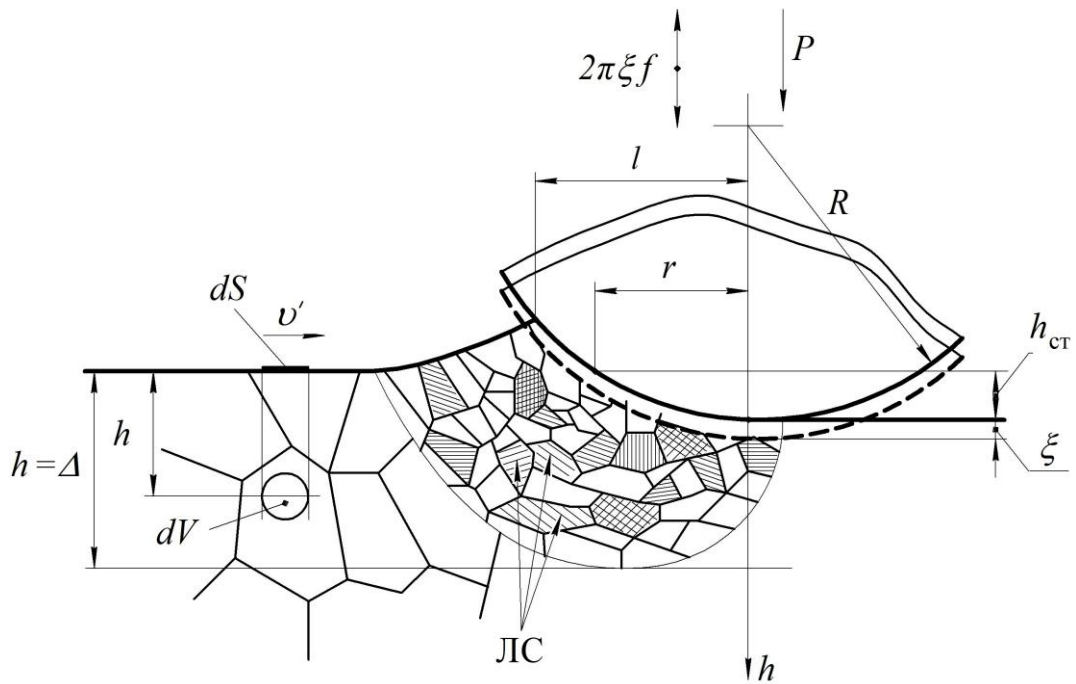


Рисунок 3.1 – Схема контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью в процессе УЗВ (ЛС – линии скольжения)

За время обработки плотность дислокаций в микрообъеме dV возрастет от некоторого исходного значения $\rho_{\text{исх}}$ до значения $\rho(h)$.

Известно [38], что скорость изменения плотности дислокаций $d\rho/dt$ пропорционально их полному потоку $j = \rho \cdot v_d$, где v_d – скорость перемещения дислокаций

$$\frac{d\rho}{dt} = \delta \rho v_d, \quad (3.1)$$

где коэффициент δ , согласно [39] есть величина, обратно пропорциональная расстоянию пробега дислокации λ между актами размножения, т.е. $\delta = 1/\lambda$. Тогда, для (3.1) запишем

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{v_d}{\lambda} \rho. \quad (3.2)$$

Уравнение (3.2) описывает скорость накопления дислокаций без учета их аннигиляции (взаимослияния). Аннигиляция дислокаций обусловлена вероятностью встречи двух дислокаций, движущихся навстречу друг другу. Математически это можно выразить с помощью уравнения

$$\frac{d\rho}{dt} = -v_d h_a \rho^2, \quad (3.3)$$

где h_a – расстояние аннигиляции дислокаций, мкм.

Тогда, с учетом (3.2) и (3.3) получим уравнение кинетики дислокаций в микрообъеме поверхностного слоя:

$$\frac{d\rho}{dt} = v_d \left(\frac{1}{\lambda} \rho - h_a \rho^2 \right) \quad (3.4)$$

Скорость дислокаций v_d связана со скоростью пластической деформацией $\dot{\varepsilon}$ соотношением $v_d = \dot{\varepsilon} / b\rho$ [9], где $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon/dt$, тогда из (3.4) получим:

$$\frac{d\rho}{d\varepsilon} = \frac{1}{b\lambda} \left(1 - \lambda h_a \rho \right) \quad (3.5)$$

Уравнение (3.5) описывает кинетику плотности дислокаций с учетом пластической деформации поверхностного слоя.

Решение уравнения для стационарного случая, когда $d\rho/d\varepsilon = 0$, дает выражение для максимальной плотности дислокаций:

$$\rho_{\max} = \frac{1}{\lambda h_a}. \quad (3.6)$$

Введем безразмерную плотность дислокаций:

$$\bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_{max}}, \quad (3.7)$$

Тогда с учетом (3.7) уравнение (3.5) преобразуется к виду:

$$\frac{d\bar{\rho}}{d\varepsilon} = \frac{h_a}{b} \left(-\bar{\rho} \right) \quad (3.8)$$

Решение дифференциального уравнения (3.8) с учетом начальных условий $\varepsilon = 0$ и $\bar{\rho}(\varepsilon = 0) = \bar{\rho}_{исх}$, получим:

$$\varepsilon = \frac{b}{h_a} \left(\ln \left[-\bar{\rho} \right] + \ln \left[-\bar{\rho}_{исх} \right] \right) \quad (3.9)$$

Переходя от безразмерных координат, а также учитывая, что $\bar{\rho}_{исх} \ll 1$, получим выражение для плотности дислокаций, накопленных в микрообъеме за определенный цикл пластической деформации:

$$\rho = \frac{1}{\lambda h_a} \left(1 - \exp \left[-\frac{h_a}{b} \varepsilon \right] \right). \quad (3.10)$$

Связь плотности дислокаций с напряжениями определяется уравнением [40]:

$$\sigma_i = \alpha G b \sqrt{\rho}, \quad (3.11)$$

где α – коэффициент междислокационного взаимодействия (по данным [9] равен 0,28)

Для условия действия переменных напряжений, например при ультразвуковой обработке, выражение (3.11) представим в виде:

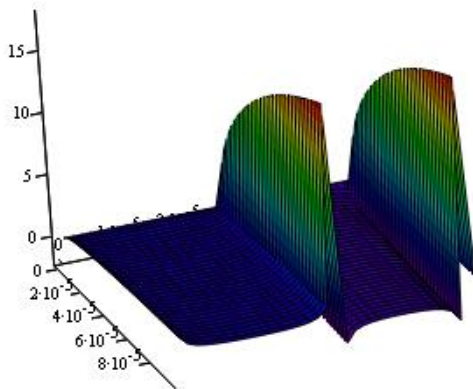
$$\sigma_i + \sigma_\xi \sin(2\pi ft) = \alpha Gb \sqrt{\rho}. \quad (3.12)$$

С учетом (3.12) выражение (3.10) примет вид

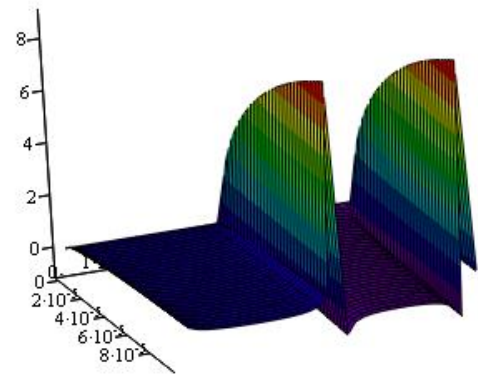
$$\sigma_i + \sigma_\xi \sin(2\pi ft) = \alpha Gb \left(\frac{1}{\lambda h_a} \left(1 - \exp \left[-\frac{h_a}{b} \varepsilon_i \right] \right) \right)^{1/2}. \quad (3.13)$$

Введем коэффициент $K_\xi = \sigma_\xi / \sigma_i$ характеризующего отношение амплитуды переменного напряжения к статическому. Тогда для выражения (3.13) получим формулу:

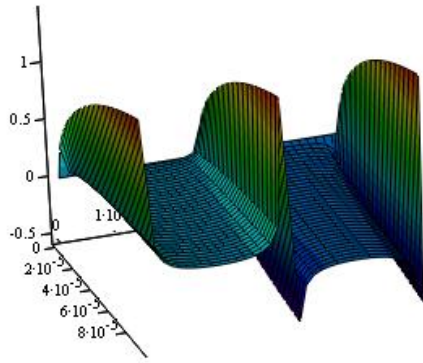
$$\sigma_i \left(1 + K_\xi \sin(2\pi ft) \right) = \alpha Gb \left(\frac{1}{\lambda h_a} \left(1 - \exp \left[-\frac{h_a}{b} \varepsilon_i \right] \right) \right)^{1/2}, \quad (3.14)$$



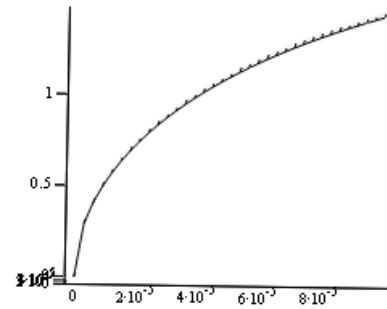
а) $K_\xi = 5$; $\lambda = 5 \text{ мкм}$; $h_a = 2 \text{ мкм}$



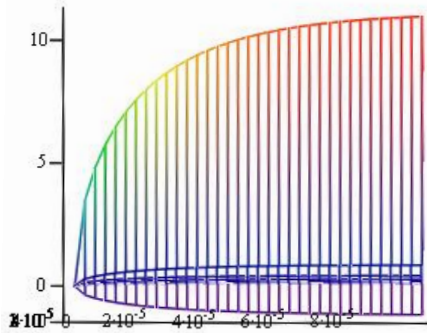
б) $K_\xi = 5$; $\lambda = 2 \text{ мкм}$; $h_a = 2 \text{ мкм}$



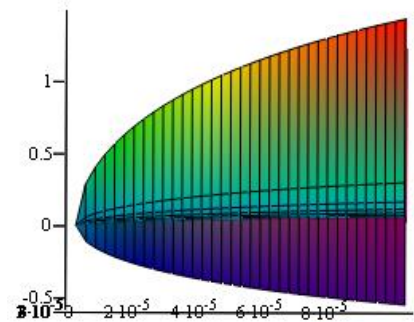
в) $K_\xi = 20$; $\lambda = 5$ мкм; $h_a = 2$ мкм



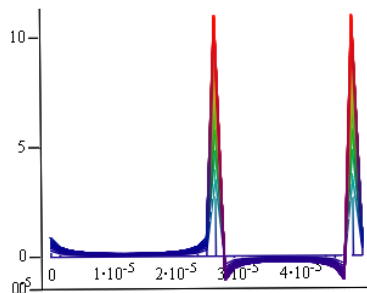
г) $K_\xi = 0$; $\lambda = 2$ мкм; $h_a = 2$ мкм



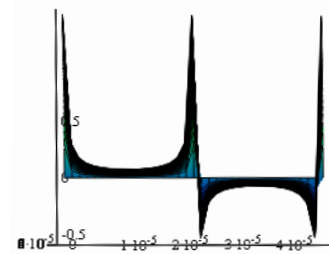
д) $K_\xi = 5$; $\lambda = 2$ мкм; $h_a = 2$ мкм



е) $K_\xi = 20$; $\lambda = 5$ мкм; $h_a = 2$ мкм



ж) $K_\xi = 5$; $\lambda = 2$ мкм; $h_a = 2$ мкм



з) $K_\xi = 20$; $\lambda = 5$ мкм; $h_a = 2$ мкм

Рисунок 3.2 – Эпюры эволюции напряжений при воздействии УЗ-колебаний за период колебания в результате самоорганизации дислокационной структуры поверхностного слоя

На рисунке 3.2. представлены графические зависимости напряжения от деформации, рассчитанные по формуле (3.14) при различных значениях K_ξ , λ , h_a .

В энергетическом аспекте процесс пластической деформации сопровождается накоплением в объемах поверхностного внутренней (скрытой) энергии пластической деформации $U_c(h)$. Эта энергия связана с накопи-

ваемой плотностью дислокаций. Известно [40], что на единицу длины дислокации приходится плотность внутренней энергии, рассчитываемая по формуле:

$$U_c = Gb^2. \quad (3.15)$$

Тогда, с учетом уравнения (3.10), накопленная плотность внутренней энергии в единице микрообъема будет определяться выражением:

$$U_c = \frac{Gb^2}{\lambda h_a} \left(1 - \exp \left[-\frac{h_a}{b} \varepsilon \right] \right). \quad (3.16)$$

Для расчета тепловой составляющей внутренней энергии, как энергии «ответственной» за подвижность дислокаций воспользуемся следующими соображениями. Силу, приходящуюся на единицу длины дислокации, согласно [41, 42] можно определить из соотношения $F_d = \sigma_i \cdot b$, где σ_i рассчитывается с учетом действия амплитудного напряжения. Тогда энергия, затрачиваемая на сдвиг дислокации на величину λ (расстояние свободного пробега), будет равна

$$u_T = \epsilon_0 + \sigma_\xi \sin(2\pi ft) b \lambda \quad (3.17)$$

С учетом плотности всех дислокаций, накопленных за время обработки, на их сдвиг потребуется затратить энергию:

$$U_T = \epsilon_0 + \sigma_\xi \sin(2\pi ft) \frac{b}{h_a} \left(1 - \exp \left[-\frac{h_a}{b} \varepsilon \right] \right) \quad (3.18)$$

С учетом полученных зависимостей для расчета накопленной микрообъеме плотности внутренней энергии и ее тепловой составляющей (3.16),

(3.18) уравнение энергетического баланса (2.6) при котором в системе происходят самоорганизующие процессы (минимум производства энтропии) примет следующий вид:

$$1 = \left(\left(1 - \exp \left[-\frac{h_a}{b} \varepsilon \right] \right) \frac{\Delta}{dl} \frac{b}{h_a} \right) \left(\frac{Gb + \sigma_0 + \sigma_\xi \sin(2\pi ft)}{\lambda \sigma_0 + \sigma_\xi \sin(2\pi ft)} \right) \quad (3.19)$$

Преобразуем уравнение (3.19) к виду

$$\frac{G}{\sigma_0} \left(1 + K_\xi \sin(2\pi ft) \right) = \left(1 - \exp \left[-\frac{h_a}{b} \varepsilon \right] \right)^{-1} \frac{\lambda}{b} \left(\frac{h_a}{b} \frac{dl}{\Delta} - 1 \right) \quad (3.20)$$

Полученное уравнение (3.20) характеризует количественную связь параметров внешнего воздействия (σ_0 , K_ξ , f) на единичную площадку контакта dl со структурными параметрами (λ , h_a) материала в процессе деформации ε микрообъема поверхностного слоя при котором происходят самоорганизующиеся процессы.

Получим математическую модель для накопления плотности дислокаций от времени обработки, т.е. в явном виде. Модель по уравнению (3.10) позволяет рассчитать плотность дислокаций в зависимости от накопленной пластической деформации поверхностного слоя.

В формуле (3.2) учтем, что расстояние пробега дислокации λ равно расстоянию между дислокациями, можно оценить как $1/\rho^{1/2}$

Тогда выражение (3.2) примет вид:

$$\frac{d\rho}{dt} = \nu_d \rho^{3/2}. \quad (3.21)$$

Для скорости дислокаций с учетом того, что скорость пластической деформации связана со скоростью деформирования, получим соотношение:

$$v_d = \varepsilon \frac{v}{lb\rho}, \quad (3.22)$$

где ε – величина относительной деформации при выглаживании; l – длина контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью, мм; b – вектор Бюргерса, мм.

Для условия ультразвуковой обработки величину относительной деформации ε представим формулой

$$\varepsilon = \frac{h_{ст} + \xi(t)}{R}, \quad (3.23)$$

где $\xi(t)$ – переменное смещение инструмента, которое можно представить в виде:

$$\xi(t) = \xi \sin(2\pi ft), \quad (3.24)$$

Перепишем выражение (3.24) в следующем виде:

$$\varepsilon = \varepsilon' (1 + K_\varepsilon \sin(2\pi ft)), \quad (3.25)$$

где ε' – величина относительной деформации при статическом внедрении инструмента ($\varepsilon' = h_{ст}/R$), K_ε – введенный коэффициент, определяющий отношение амплитуды колебаний инструмента к величине его внедрения

в обрабатываемую поверхность $K_\varepsilon = \frac{\xi}{h_{ст}}$.

Аналогичным образом представим выражение для определения скорости обработки, которая будет складываться из скорости v' перемещения единичной площадки dS скорости колебания:

$$v = v' + 2\pi f \xi \cos(2\pi f t). \quad (3.26)$$

Перепишем (3.26) в виде:

$$v = v' \left(+ K_v \cos(2\pi f t) \right), \quad (3.27)$$

где введенный коэффициент $K_v = \frac{2\pi f \xi}{v'}$ определяет отношение максимальной скорости колебаний инструмента к скорости перемещения единичной площадки равной

С учетом полученных промежуточных выражений (3.22), (3.23), (3.25) и (3.27) уравнение для плотности дислокаций преобразуется к виду:

$$\frac{d\rho}{dt} = \varepsilon' \frac{v'}{lb} \left(+ K_\varepsilon \sin(2\pi f t) \right) \left(+ K_v \cos(2\pi f t) \right) \rho^{1/2}, \quad (3.28)$$

С целью упрощения, перепишем уравнение (3.28):

$$\frac{d\rho}{dt} = \varepsilon' \frac{v'}{lb} f(K_\varepsilon, K_v, t) \rho^{1/2}, \quad (3.29)$$

где

$$f(K_\varepsilon, K_v, t) = \left(+ K_\varepsilon \sin(2\pi f t) \right) \left(+ K_v \cos(2\pi f t) \right) \quad (3.30)$$

Дальнейшее составление уравнения упростим и рассмотрим для случая максимального внедрения инструмента в обрабатываемую поверхность

(рисунок 3.3), т.е. для периода времени $t = \frac{3}{4} T$. При этом, выражение для функции (3.30) примет более простой вид:

$$f(K_\varepsilon, K_\nu, \frac{3}{4} T) = 1 + K_\varepsilon. \quad (3.31)$$

Тогда, уравнение (3.29) для плотности дислокаций примет вид

$$\frac{d\rho}{dt} = \varepsilon' \frac{\nu'}{l b} (1 + K_\varepsilon) \rho^{1/2}. \quad (3.32)$$

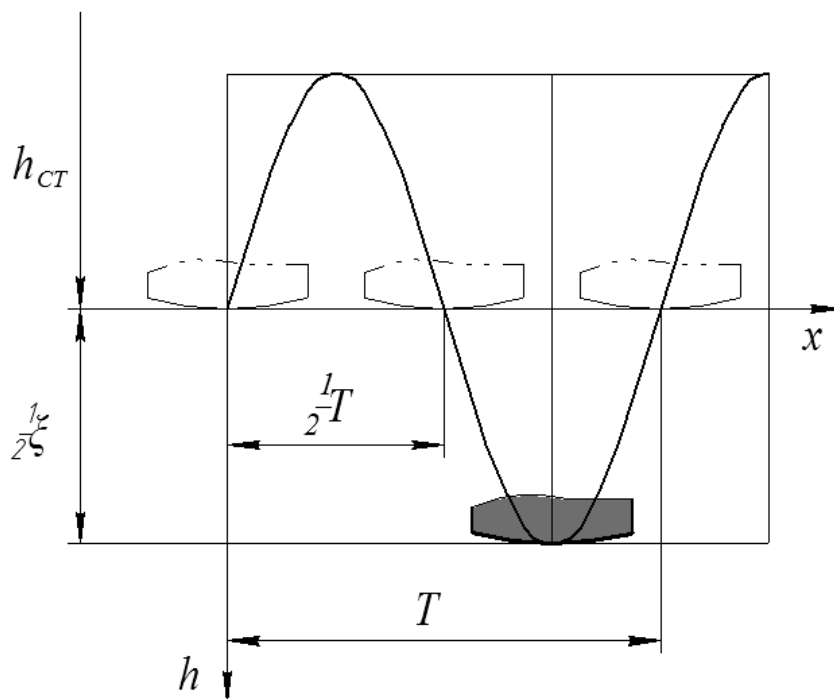


Рисунок 3.3 – Схема перемещения
инструмента при УЗВ

Кинетическое уравнение (3.32) описывает положительную динамику увеличения плотности дислокаций в течении внешнего воздействия на материал. Однако, в процессе обработки в результате взаимодействия дислокаций возникает вероятность их взаимоуничтожения (аннигиляции) Анни-

гиляция дислокаций возникает в результате их встречи друг с другом при движении в параллельных плоскостях скольжения, но при соблюдении условия достаточного для аннигиляции расстояния между этими плоскостями. Выражение для расстояния аннигиляции дислокаций находится в виде [41]:

$$h_a = \frac{Gb}{2\pi(1-\mu)\sigma_i(h)} \quad (3.33)$$

где G – модуль сдвига, МПа; μ – коэффициент Пуассона; $\sigma_i(h)$ – действующие на глубине h напряжения, обусловленные внешней нагрузкой, МПа.

Тогда кинетическое уравнение для плотности аннигилирующих дислокаций представим в виде:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\varepsilon' \frac{\nu'}{l} \frac{G}{\sigma_{0ct}} \frac{1}{2\pi(1-\mu)g(h)} \frac{(1+K_\varepsilon)}{(1+K_\sigma)} \rho. \quad (3.34)$$

Общее кинетическое уравнение примет вид

$$\frac{d\rho}{dt} = \varepsilon' \frac{\nu'}{lb} \left[1 + K_\varepsilon \rho^{1/2} - \varepsilon' \frac{\nu'}{l} \frac{G}{\sigma_{0ct}} \frac{1}{2\pi(1-\mu)g(h)} \frac{(1+K_\varepsilon)}{(1+K_\sigma)} \rho \right]. \quad (3.35)$$

Рассмотрим решение уравнения (3.35) для случая, когда прирост плотности дислокаций «уравновешивается» процессом их аннигиляции, т.е. уравнение (3.35) приравняем к нулю. Этому условию соответствует достижение некоторой «равновесной» плотности дислокаций:

$$\rho_{\max}(h) = \left(\frac{2\pi(1-\mu)\sigma_{\text{ост}}g(h)}{Gb} (1 + K_{\sigma}) \right)^2. \quad (3.36)$$

Введем безразмерные переменные для плотности дислокаций и времени. С учетом безразмерных переменных, преобразуем уравнение (3.36) к виду:

$$\frac{d\bar{\rho}}{d\bar{t}} = C \left(\bar{\rho}^{1/2} - \bar{\rho} \right), \quad (3.37)$$

где $\bar{\rho}$ – безразмерная плотность дислокаций; $\bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_{\max}}$

\bar{t} – безразмерное время. $\bar{t} = \frac{t}{l} v'$

$$C = \varepsilon' \left(\frac{1 + K_{\varepsilon}}{1 + K_{\sigma}} \right) \left(\frac{G}{\sigma_{\text{ост}}} \right) \frac{1}{2\pi(1-\mu)g(h)}$$

Решая дифференциальное уравнение (3.37) с учетом начальных условий $\bar{t} = 0$ и $\bar{\rho}(\bar{t} = 0) = \bar{\rho}_{\text{исх}}$, получим формулу

$$\bar{\rho} = \left(1 - \exp \left[-\frac{1}{2} C \bar{t} + \ln(1 - \sqrt{\bar{\rho}_{\text{исх}}}) \right] \right)^2. \quad (3.38)$$

Переходя от безразмерных координат и вводя для времени обработки выражение $t = \frac{l}{v_{\text{ст}}} \cdot \frac{a}{s}$, (a – ширина зоны воздействия на материал инструментом, мм; s – продольная подача инструмента, мм/мин), а также учитывая, что $\bar{\rho}_{\text{исх}} \ll 1$, получаем:

$$\rho = \rho_{\max} \left(1 - \exp \left[-\frac{1}{2} C \left(\frac{a}{s} \right) \right] \right)^2. \quad (3.39)$$

С учетом ранее полученных значений для ρ_{\max} и C , окончательно получаем:

$$\begin{aligned} \rho(h) = & \left(\frac{2\pi(1-\mu)\sigma_{\text{ост}}g(h)}{Gb} (1+K_\sigma) \right)^2 \times \\ & \times \left(1 - \exp \left[-\frac{1}{2} \varepsilon' \left(\frac{1+K_\varepsilon}{1+K_\sigma} \right) \left(\frac{G}{\sigma_{\text{ост}}} \right) \frac{1}{2\pi(1-\mu)g(h)} \left(\frac{a}{s} \right) \right] \right)^2. \end{aligned} \quad (3.40)$$

При $g(h=0) = 1$ получаем формулу для расчета поверхностной плотности дислокаций

$$\begin{aligned} \rho(0) = & \left(\frac{2\pi(1-\mu)\sigma_{\text{ост}}}{Gb} (1+K_\sigma) \right)^2 \times \\ & \times \left(1 - \exp \left[-\frac{1}{2} \varepsilon' \left(\frac{1+K_\varepsilon}{1+K_\sigma} \right) \left(\frac{G}{\sigma_{\text{ост}}} \right) \frac{1}{2\pi(1-\mu)} \left(\frac{a}{s} \right) \right] \right)^2. \end{aligned} \quad (3.41)$$

Для расчета геометрических размеров очага воздействия на материал (площадь контакта) воспользуемся соотношениями:

$$\begin{aligned} a &= 2\sqrt{2R}\sqrt{\varepsilon'} \\ \sigma_{\text{ост}} &\approx 3 \cdot \sigma_{0,2} \end{aligned} \quad (3.42)$$

С учетом (3.42) получим:

$$\rho(h) = \left(\frac{6\pi(1-\mu)\sigma_{0,2}g(h)}{Gb} (1+K_\sigma) \right)^2 \times \left(1 - \exp \left[-\frac{\sqrt{2}}{2} \varepsilon'^{1/2} \frac{1}{s} \frac{\langle \varepsilon'R + \xi \rangle}{\langle +K_\sigma \rangle} \frac{G}{6\pi(1-\mu)\sigma_{0,2}g(h)} \right] \right)^2 \quad (3.43)$$

При $h = 0$ и $g(h = 0) = 1$, получим формулу для расчета плотности дислокаций, накопленных в приповерхностном слое

$$\rho(0) = \left(\frac{6\pi(1-\mu)\sigma_{0,2}}{Gb} (1+K_\sigma) \right)^2 \times \left(1 - \exp \left[-\frac{\sqrt{2}}{2} \varepsilon'^{1/2} \frac{1}{s} \frac{\langle \varepsilon'R + \xi \rangle}{\langle +K_\sigma \rangle} \frac{G}{6\pi(1-\mu)\sigma_{0,2}} \right] \right)^2 \quad (3.44)$$

Коэффициент K_σ определим из отношения амплитудного значения напряжения к статическому напряжению. Амплитуда напряжения рассчитывается по формуле [17]:

$$\sigma_\xi = 2\pi\tilde{\rho}cf\xi, \quad (3.45)$$

где $\tilde{\rho}$ – плотность; c – скорость звука в твердом теле, м/с, определяется из формулы [43]

$$c = \sqrt{\frac{E}{\tilde{\rho}(1-2\mu)}}, \quad (3.46)$$

где E – модуль упругости

Тогда, с учетом (3.45), (3.46) и $\sigma_{\text{ост}} \approx 3\sigma_{0,2}$ получим зависимость для расчета коэффициента

$$K_{\sigma} = \frac{2\pi f \xi}{3\sigma_{0,2}} \sqrt{\frac{E\tilde{\rho}}{(1-2\mu)}}. \quad (3.47)$$

Величина относительной деформации ε' связана с усилием P внедрения инструмента [44]

$$P = \pi \varepsilon' H_{\mu(\text{исх})} R^2, \quad (3.48)$$

где $H_{\mu(\text{исх})}$ – исходная микротвердость обрабатываемой поверхности, Н/мм².

С учетом (3.47), (3.48) получим выражение для определения плотности дислокаций в виде:

$$\rho(h) = \left((1 + K_{\sigma}) g(h) \frac{K_M}{b} \right)^2 \left(1 - \exp\left[-\frac{\Pi}{g(h)} \right] \right)^2, \quad (3.49)$$

где $K_M = \frac{6\pi(1-\mu)\sigma_{0,2}}{G}$ – безразмерный коэффициент, характеризующий физико-механические свойства обрабатываемого материала.

$$\Pi = \frac{\sqrt{2}}{2} \left(\frac{1}{s} \right) \left(\frac{1}{R} \right) \left(\frac{P}{\pi H_{\mu(\text{исх})}} \right)^{1/2} \left(\frac{2P}{\pi H_{\mu(\text{исх})} R} + \xi \right) \left(\frac{1}{1 + K_{\sigma}} \right) \left(\frac{1}{K_M} \right), \quad (3.50)$$

где в безразмерный параметр Π включены технологические режимы энергетического воздействия на материал и его исходные физико-механические свойства.

Для определения функции $g(h)$, характеризующей распределение накопленной плотности дислокаций по глубине поверхностного слоя, необходимо получить выражение для распределения действующих на глубине напряжений.

В [45] получено решение для определения интенсивности напряжений и характера их распределения по глубине поверхностного слоя:

$$\sigma_i(h) = \sigma_0 \left[\frac{1,5}{1 + \left(\frac{h}{r}\right)^2} - (1 + \mu) \left(1 - \frac{z}{r} \operatorname{arctg}\left(\frac{h}{r}\right)\right) \right], \quad (3.51)$$

где σ_0 – нормальное давление на поверхности контакта Н/мм²; r – радиус контакта, мм.

Зависимость (3.51) можно аппроксимировать с достаточной для дальнейших расчетов точностью и в физически обоснованном интервале значений безразмерной координаты h/r , от 0,5 до 3. В итоге получим уравнение:

$$\sigma_i(h) = \sigma_0 \exp\left[-0,8 \frac{h}{r}\right]. \quad (3.52)$$

Таким образом, функцию $g(h)$ можно представить в виде

$$g(h) = \exp\left[-0,8 \frac{h}{r}\right]. \quad (3.53)$$

Распределение плотности дислокаций по глубине, полученные по результатам расчета, представлены на рисунке 3.4, в зависимости от параметров внешнего воздействия (усилия P и амплитуды колебаний ξ). Как следует из анализа рисунка введение дополнительной энергии способствует в значительной степени увеличению плотности дислокаций и как следствие приводит к упрочнению поверхностного слоя.

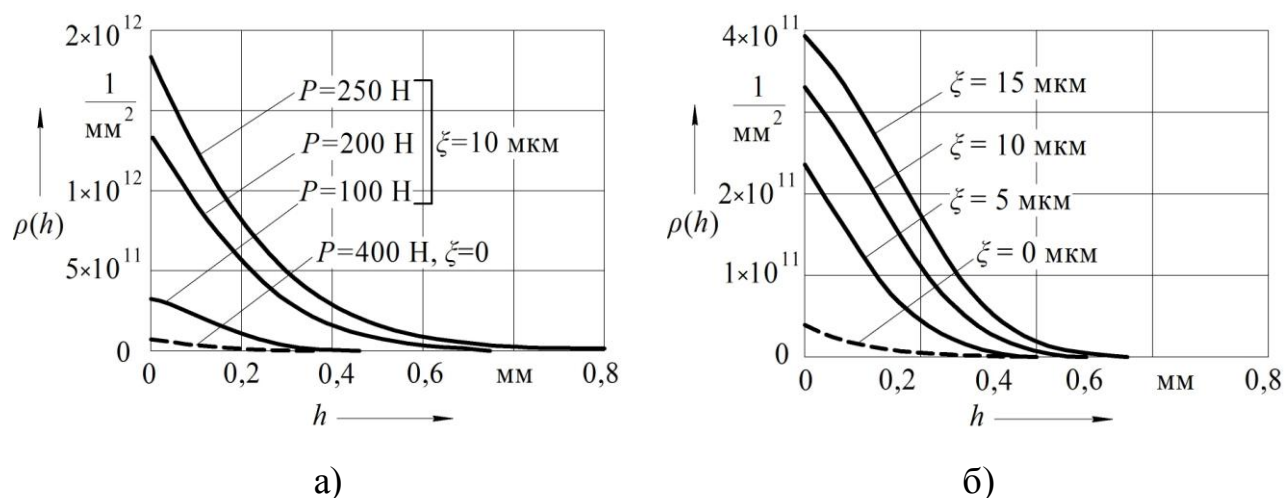


Рисунок 3.4 – Влияние усилия P (а) и амплитуды УЗ-колебаний ξ (б) на характер распределения плотности дислокаций ρ по глубине ПС

3.2 Кинетические уравнения структурно-фазовых превращений в поверхностном слое в результате воздействия термических циклов

Одним из важнейших условий качественной обработки при комбинированном энергетическом воздействии является выбор оптимальных режимов, исключающий структурные изменения обрабатываемой поверхности вследствие ее нагрева.

Кинетическая теория [46, 47, 48] образования дефектного слоя отпуска основана на анализе термоактивированных процессов диффузионных превращений, скорость которых зависит от температуры, а степень завершенности - от времени воздействия. При анализе дефектного слоя отпуска в поверхностном слое при нагреве в процессе шлифования основной

расчетной величиной является доля новой фазы в зависимости от расстояния до поверхности и времени.

Известные модели фазовых превращений относятся к изотермическим условиям [48, 49, 50, 51], в то время как для разработки инженерного метода расчета дефектного слоя первостепенное значение приобретает учет реальной неизотермичности процесса превращения, то есть температурной зависимости константы скорости реакции. В отличие от теории [52] определения толщины дефектного слоя по глубине проникновения изотермы, соответствующей критической температуре, кинетическая теория образования дефектного слоя [53, 54] позволяет более корректно определять толщину слоя, подвергшегося термоактивированному фазовому превращению, непосредственно по распределению новой фазы.

Образование дефектного слоя отпуска при нагреве поверхности в ходе обработки связано с диффузионной перестройкой структуры поверхностных слоев металла, поэтому во многих случаях энергия активации образования дефектного слоя отпуска оказывается близкой к энергии активации U диффузии основного легирующего элемента. В соответствии с формальной кинетикой процессов зарождения и роста [55], приращение

$$d\psi = h(1-\psi)dt \quad (3.21)$$

относительного объема ψ новой фазы за время действия dt повышенной температуры $T(t, y)$ на глубине y подповерхностного слоя детали пропорционально произведению относительного объема $(1-\psi)$ старой фазы и коэффициента

$$h = \nu \exp\left(-\frac{U}{R(T_w + T(t, y))}\right), \quad (3.22)$$

который характеризует скорость реакции. Здесь T_w – исходная температура детали, R – универсальная газовая постоянная, ν – предэкспонциальный множитель, имеющий размерность частоты.

Распределение твердости $H(y)$ поверхностного слоя по глубине y после обработки определяется распределением новой фазы $\psi(y)$ в виде:

$$H(y) = H_3 - (H_3 - H_1)\psi(y), \quad (3.23)$$

где H_1 и H_3 – минимальная и максимальная твердость полностью отпущенного и полностью закаленного материала соответственно. Если H_0 – исходная твердость материала до обработки, то начальное условие для интегрирования дифференциального уравнения имеет вид:

$$\psi_0 = (H_3 - H_0)/(H_3 - H_1) \quad (3.24)$$

Распределение новой фазы в поверхностном слое после интегрирования находится в виде:

$$\psi = 1 - 1/\sqrt{1/(1 - \psi_0)^2 + 2J}, \quad (3.25)$$

где интеграл, описывающий суммарную дозу воздействия

$$J = \nu \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{U}{R(T_w + T(t, y))}\right) dt, \quad (3.26)$$

берется по всему термическому циклу нагрева и охлаждения на данной глубине y . Переход к безразмерным параметрам, решение температурной

задачи и вычисление интеграла термической повреждаемости J методом перевала дают следующие зависимости [262]:

$$J(Y) = p \sqrt{\frac{2\pi}{\lambda a_2}} \left(1 + \lambda a_0 \right) \exp\left(-\frac{\lambda}{r + a_0}\right), \quad (3.27)$$

где

$$\begin{aligned} a_0(Y) &= 1/(0.907 + 1.3Y^{1.2}) \\ a_2(Y) &= 1/(0.317 + 0.3Y + Y^5) \end{aligned} \quad (3.28)$$

Безразмерное расстояние до поверхности $Y = y/y_0$ и входящие в эти выражения безразмерные параметры

$$\begin{aligned} \lambda &= U/(RT_0) \\ p &= \nu\tau \\ r &= T_w/T_0 \end{aligned}, \quad (3.29)$$

выражаются через параметры материала (U, ν, k, c) , параметры инструмента и детали (D_w, D_s) и режимы обработки (a, V_w, V_s) посредством введения масштабов температуры $T_0 = \varepsilon \mu a / \sqrt{k c \tau}$, времени $\tau = \sqrt{D_e a} / V_w$ и расстояния до поверхности $y_0 = \sqrt{k \tau / c}$.

ГЛАВА 4 Математическая модель формирования параметров качества поверхностного слоя детали

4.1 Математическая модель термопластической деформации поверхностного слоя

Приложения теории термопластической деформации как элемента синергетического подхода рассмотрим на примере подсистемы шлифования. Формообразование при шлифовании заключается в удалении припуска материала с элементарного участка поверхностного слоя. Основной проблемой при обработке является задача обеспечения заданных параметров качества при приемлемых производительности и себестоимости процесса обработки.

Удельная энергия шлифования $u = P_z V / (abV_1)$ является интегральной энергетической характеристикой процесса шлифования и равна работе, необходимой для удаления единицы объема обрабатываемого материала (здесь V_1 - скорость продольной подачи круга, $V_2 = V_1 b / L_1$ - скорость подачи круга поперек строк, b - расстояние между строками, a - глубина шлифования на данном проходе, L_1 - ширина шлифовального круга; компонента P_z вектора силы шлифования.)

На рисунке 4.1 схематично представлена расчетная схема формирования поверхностного слоя.

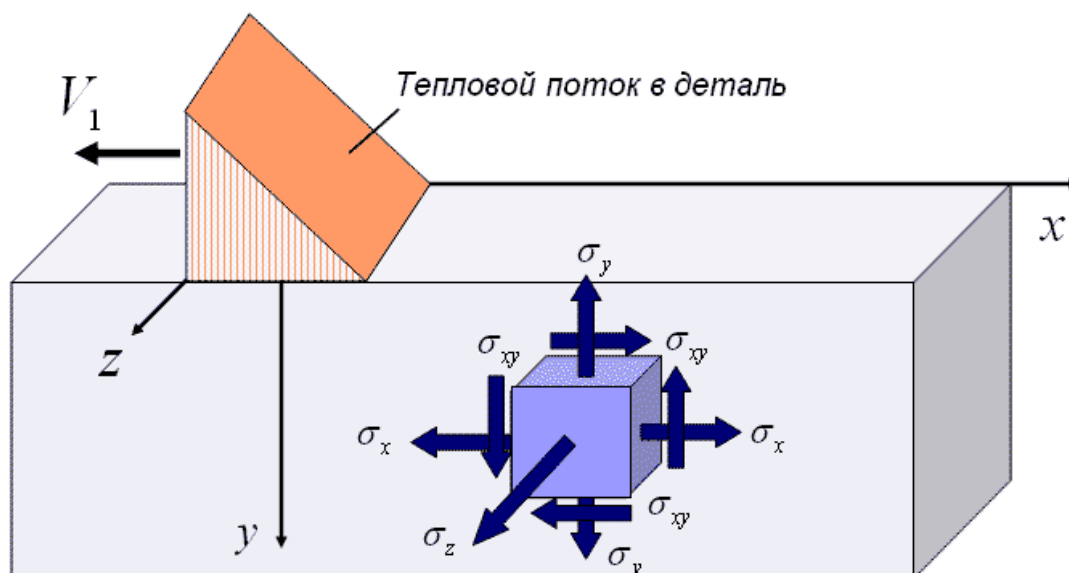


Рисунок 4.1 – Расчетная схема формирования поверхностного слоя

Температурное поле в поверхностном слое детали при шлифовании представлено на рисунке 4.12. В рассматриваемой системе координат, которая движется относительно детали со скоростью движения площадки контакта, температурное поле и другие, представленные далее поля неподвижны.

Треугольник на поверхности изображает эпюру распределения теплового потока в деталь. Неравномерность тепловыделения в контакте шлифовального круга с деталью обусловлена увеличением толщины среза в сторону движения круга. При этом максимальная температура достигается в центре контакта, что ясно видно из рисунка 4.1.

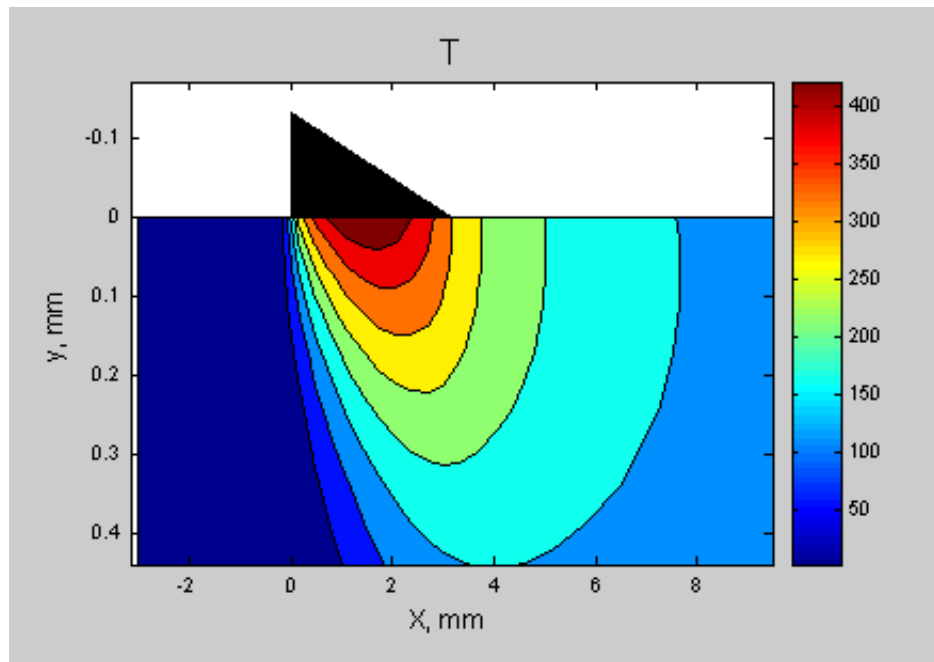


Рисунок 4.2 Температурное поле в поверхностном слое детали

Поля пластических деформаций в поверхностном слое при шлифовании представлены на рисунке 4.3. На значительном удалении от области контакта пластические деформации перестают зависеть от координаты x и превращаются в остаточные пластические деформации. Их распределение по глубине y поверхностного слоя представлено на рисунке 4.14.

Интенсивность пластических деформаций ε_i вычисляется по распределению пластических деформаций и представлена на рисунке 4.3.

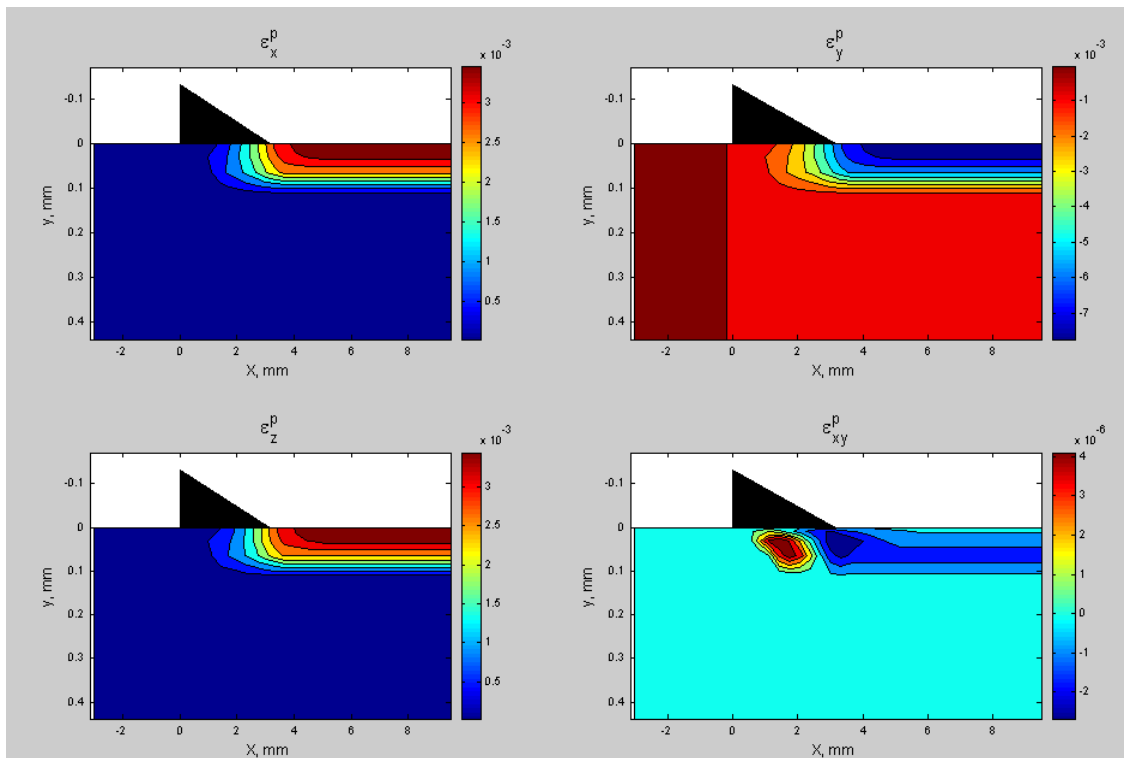


Рисунок 4.3 – Поля пластических деформаций в поверхностном слое

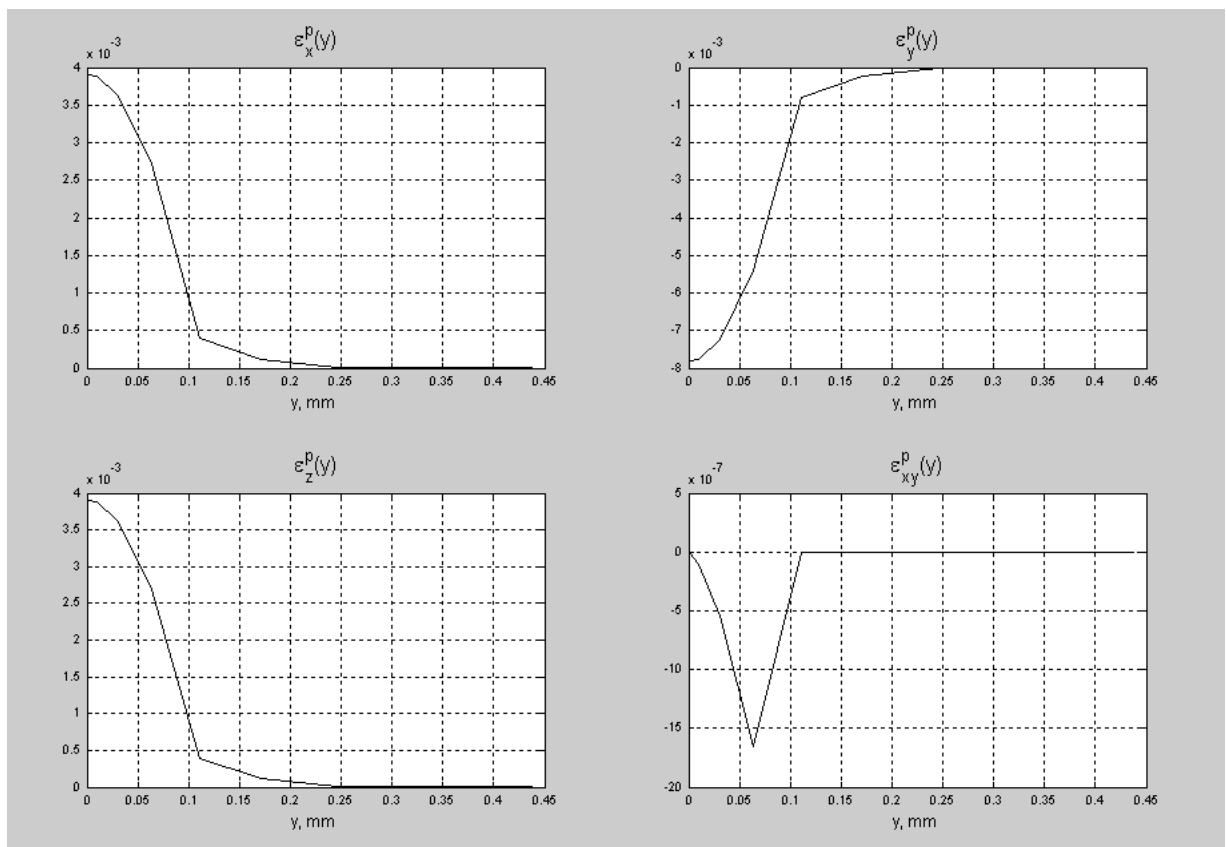


Рисунок 4.4 – Остаточные пластические деформации

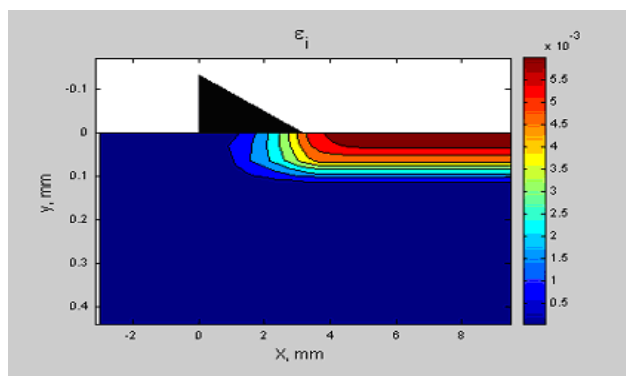


Рисунок 4.5 – Интенсивность пластических деформаций

Поле интенсивности касательных напряжений представлено на рисунке 4.6.

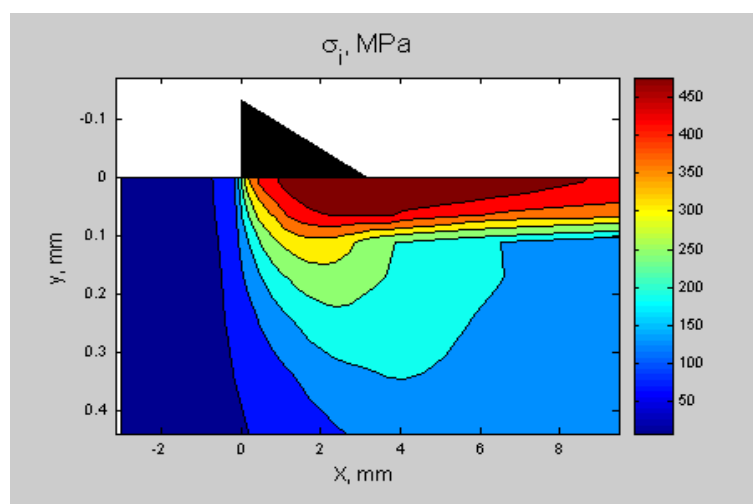


Рисунок 4.6 – Поле интенсивности касательных напряжений

Расчетные поля напряжений в поверхностном слое деталей при шлифовании представлены на рисунке 4.7. На значительном удалении от области контакта напряжения перестают зависеть от координаты x и превращаются в остаточные напряжения. Их распределение по глубине y поверхностного слоя представлено на рисунке 4.8.

Получение благоприятных сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое деталей при шлифовании с управлением циклом по энергетическим (силовым) параметрам, а именно этот случай рассмотрен в

данном примере, является результатом большой экспериментальной и теоретической работы.

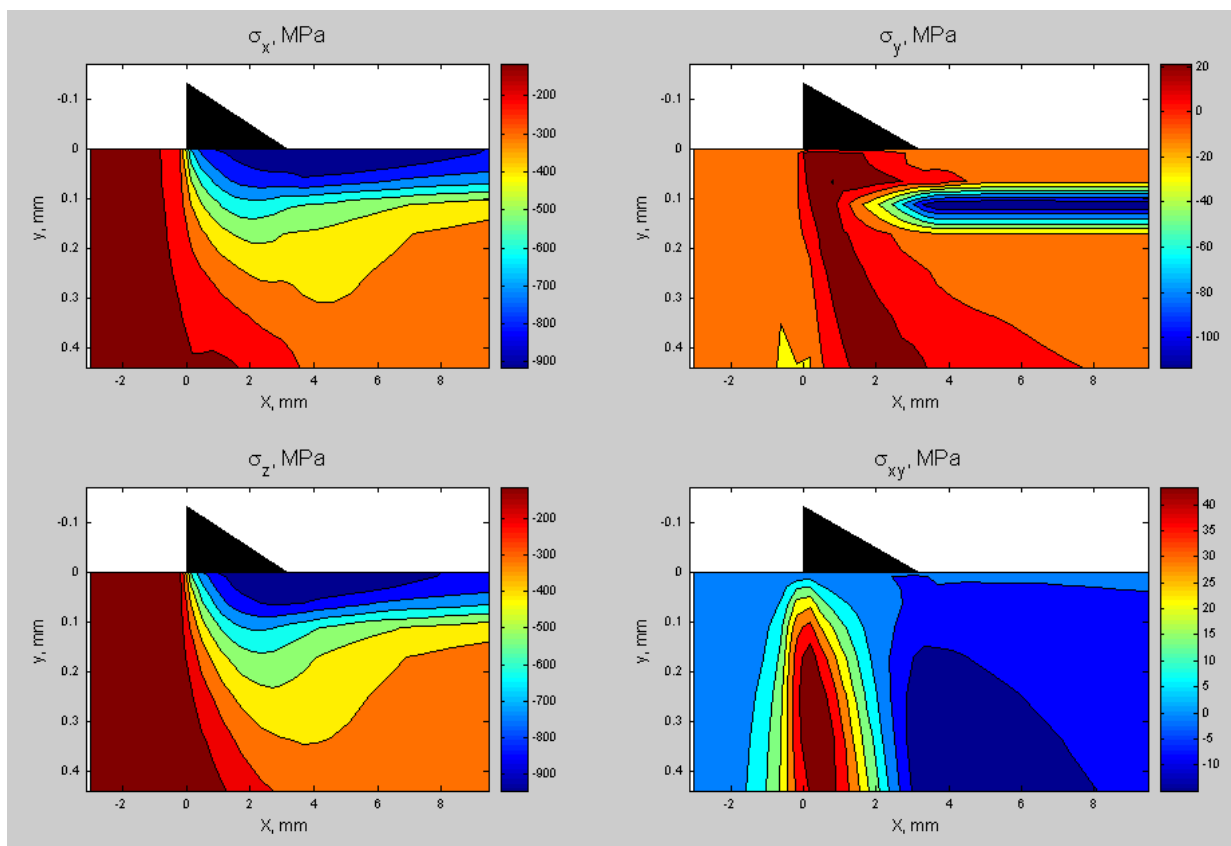


Рисунок 4.7 Поля напряжений в поверхностном слое

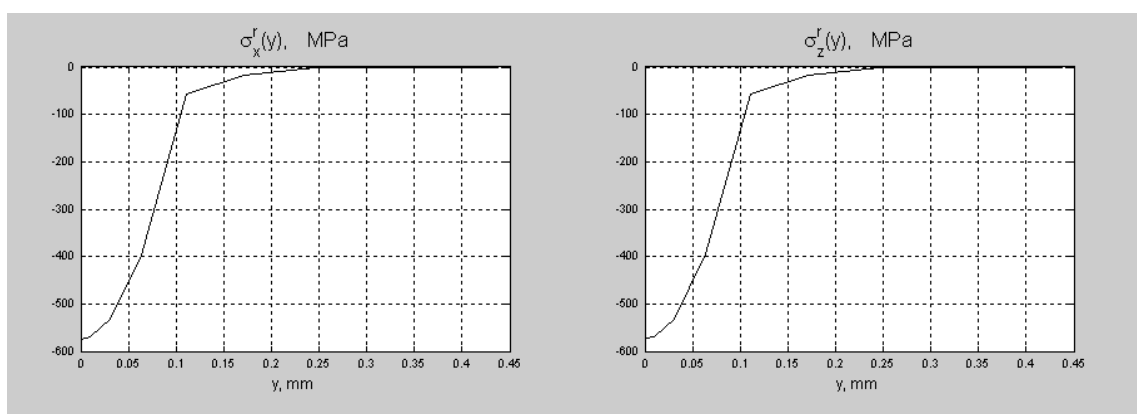


Рисунок 4.8 Остаточные напряжения в поверхностном слое

4.2 Математическая модель формирования микротвердости поверхностного слоя

Микротвердость поверхностного слоя зависит от величины накопленной пластической деформации и фазового состава материала.

Поскольку под действием нагрева в процессе обработки в обрабатываемом материале могут происходить различные фазовые превращения, то интегральная система обеспечения качества изготовления деталей включает в себя анализ подобных случаев. В простейшем варианте это последовательность отпуска и вторичной закалки в термическом цикле быстрого нагрева и охлаждения. Подобный цикл реализуется, например, в поверхностном слое материала при шлифовании. В начальной фазе термического цикла при нагреве происходит отпуск материала, а в заключительной фазе термического цикла при быстром охлаждении - вторичная закалка.

Входящая в интегральную систему обеспечения качества изготовления деталей подсистема анализа дефектных слоев и микротвердости поверхностного слоя включает в себя анализ распределения фактических толщин среза по проходам, анализ сил резания и тепловыделения в цикле шлифования, анализ температурных полей, анализ полей термоактивированных фазовых превращений в материале поверхностного слоя на основе решения соответствующих дифференциальных уравнений. На каждом проходе инструмента при этом выполняется построение эпюр микротвердости поверхностного слоя (рисунок 4.9), которые могут содержать провалы, связанные с отпуском и пики, связанные с закалкой.

В этом важном для приложений случае анализ термоактивированных фазовых и структурных превращений в материале поверхностного слоя основан на решении системы уже двух зависящих от температурного поля $T(t, y)$ дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi}{dt} &= \nu(1-\psi) \exp\left(-\frac{U}{R(T_w + T(t, y))}\right) \\ \frac{d\psi_1}{dt} &= -\nu_1(1-\psi_1) \exp\left(-\frac{U_1}{R(T_w + T(t, y))}\right) \end{aligned} \quad (4.1)$$

относительно доли фазы отпуска соответственно в процессах отпуска ψ и вторичной закалки ψ_1 . Знак « \leftarrow » во втором из этих уравнений связан с уменьшением доли фазы отпуска в процессе вторичной закалки. Действительно, в процессе отпуска (первое уравнение) доля фазы отпуска ψ увеличивается, а в процессе вторичной закалки (второе уравнение) доля фазы отпуска ψ_1 уменьшается.

Поскольку доля фазы отпуска ψ может быть определена по твердости H материала как $\psi = (H_3 - H) / (H_3 - H_1)$, где H_1 и H_3 - минимальная и максимальная твердость полностью отпущенного и полностью закаленного материала соответственно, то решение позволяет определить распределение твердости $H(y)$ поверхностного слоя по глубине y после окончания обработки в виде:

$$H(y) = H_3 - (H_3 - H_1)\psi_1(y) \quad (4.2)$$

Ясно, что начальное условие для интегрирования имеет вид $\psi|_{t=0} = (H_3 - H_0) / (H_3 - H_1)$, где H_0 - исходная твердость материала до обработки.

Введенные дифференциальные уравнения основаны на новой кинетической теории дефектного поверхностного слоя и содержат такие параметры материала как энергии активации U, U_1 и предэкспоненциальные множители ν, ν_1 констант скорости реакций. Поскольку процесс образования новых фаз происходит в значительном температурном диапазоне и

существенно зависит от времени нагрева, то попытки построения теории дефектного слоя отпуска путем введения некоторых критических температур не дают достаточно точного описания явления.

Известные модели фазовых превращений относятся к изотермическим условиям, в то время как для разработки инженерного метода расчета дефектного слоя первостепенное значение приобретает учет реальной не-изотермичности процесса превращения, то есть температурной зависимости константы скорости реакции.

Синергетическая теория образования дефектных слоев основана на анализе термоактивированных процессов диффузионных превращений, скорость которых зависит от температуры, а степень завершенности - от времени воздействия. Основной расчетной величиной при этом является доля новой фазы в зависимости от расстояния до поверхности и времени.

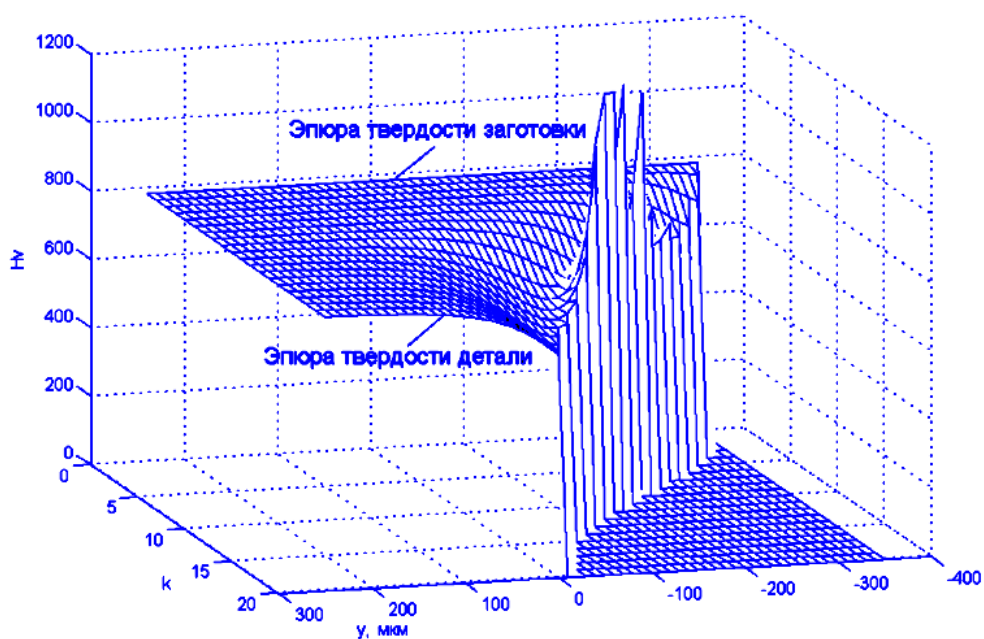


Рисунок 4.1 – Эволюция эпюры микротвердости поверхностного слоя в цикле шлифования в зависимости от числа k проходов круга

На рисунке 4.2 представлена новая схема образования дефектного поверхностного слоя с измененным фазовым составом, лежащая в основе построения эпюр микротвердости поверхностного слоя. Доля новой фазы

$\psi(y)$ на данной глубине определяется накопленной дозой термического воздействия путем интегрирования по траекториям частиц обрабатываемого материала при их движении через температурное поле.

По мере удаления поверхностных слоев в цикле шлифования эпюры микротвердости поверхностного слоя сдвигаются вглубь, изменяя свою форму. Переходим к рассмотрению цикла шлифования.

Цикл шлифования в данной точке профиля детали представлен на рисунке 4.3. При любой схеме управления формообразованием деталей на финишной операции шлифования происходит удаление припуска от начального значения до нуля. В действительности существует существенный разброс начального значения припуска, как в данной точке, так и от точки к точке по профилю пера детали. Если бы этого разброса не было, то работоспособными были бы любые умозрительные схемы управления формообразованием, и проблем по качеству не возникало бы.

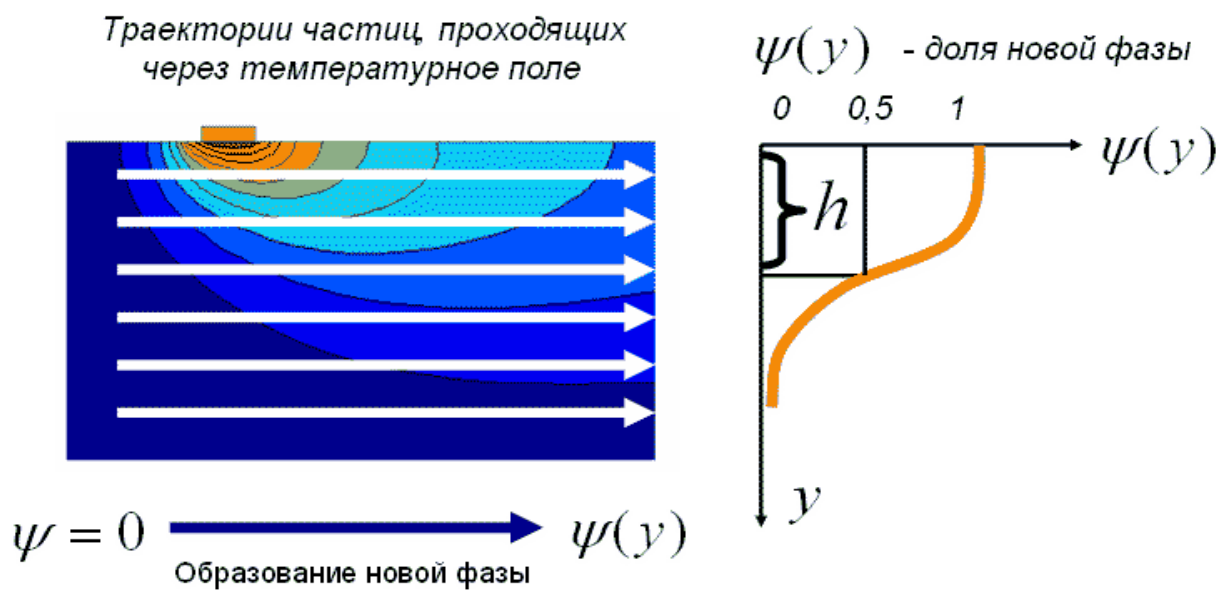


Рисунок 4.2 – Схема образования дефектного поверхностного слоя

Различные схемы формообразования деталей по существу как раз и различаются тем, как они справляются с разбросом начального припуска и порожденными им разбросами толщин среза, усилий, температур, числа

проходов, и следовательно, длительности температурного воздействия, и в конечном итоге, разбросами остаточных напряжений, фазового состава поверхностного слоя и его микротвердости.

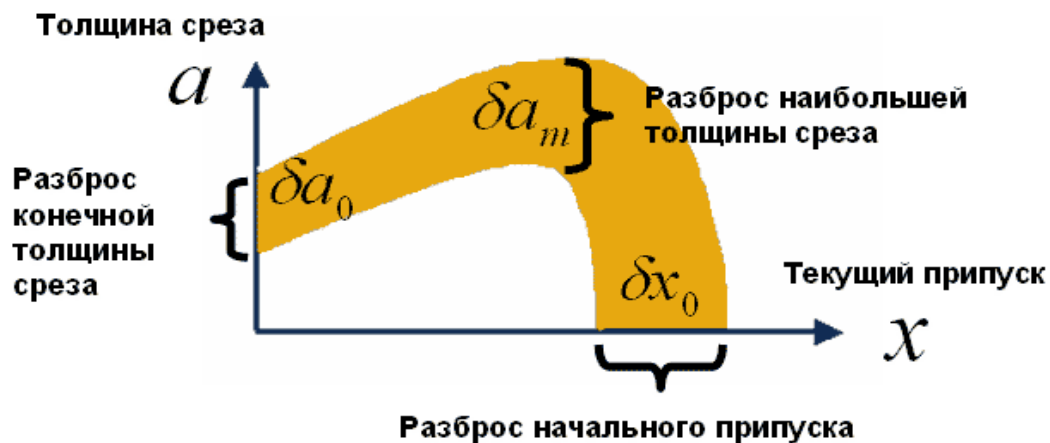


Рисунок 4.3 Разброс толщины среза в цикле шлифования

При традиционном геометрическом управлении формообразованием деталей жестко задается траектория относительного движения инструмента и детали. По новой схеме врезание шлифовального круга по нормали свободно, задается нормальная сила врезания инструмента, а при достижении номинального профиля детали дальнейшее врезание прекращается с помощью специальной кинематической цепи.

4.3 Математическая модель формирования шероховатости поверхности

Рассмотрим случайную поверхность материала в контакте со шлифовальным кругом. Расчетная схема контакта представлена на рисунке 4.4. Среднеарифметическая высота неровностей может быть определена через плотность распределения случайной координаты обработанной поверхности в виде:

$$Ra = \int_0^{\infty} |y - M| f(y) dy; M = \int_0^{\infty} y f(y) dy \quad (4.3)$$

где M - математическое ожидание координаты обработанной поверхности

Плотность распределения связана с интегральной функцией распределения равенством $dF / dy = f(y)$. В свою очередь, интегральная функция распределения случайной координаты обработанной поверхности может быть выражена через вероятность наличия в точке неударенного материала $F(y) = 1 - P_0(y)$.

Для определения вероятности $P_0(y)$ на обработанной поверхности необходимо рассмотреть процесс резания в активной зоне шлифовального круга, имеющей форму сегмента $0BC$ (см. рисунок 4.4). Обрабатываемый материал поступает в активную зону через дугу $0B$, где $P(x, y)|_{0B} = 1$. На выходе из активной зоны получаем распределение вероятностей $P_0(y)$ для обработанной поверхности, то есть $P(x, y)|_{0C} = P_0(y)$.

Получим уравнения для функции распределения неударенного материала в активной зоне $0BC$. При этом необходимо, с одной стороны, учесть перенос материала со скоростью подачи V_1 и, с другой стороны, описать процесс срезания материала отдельными абразивными кромками.

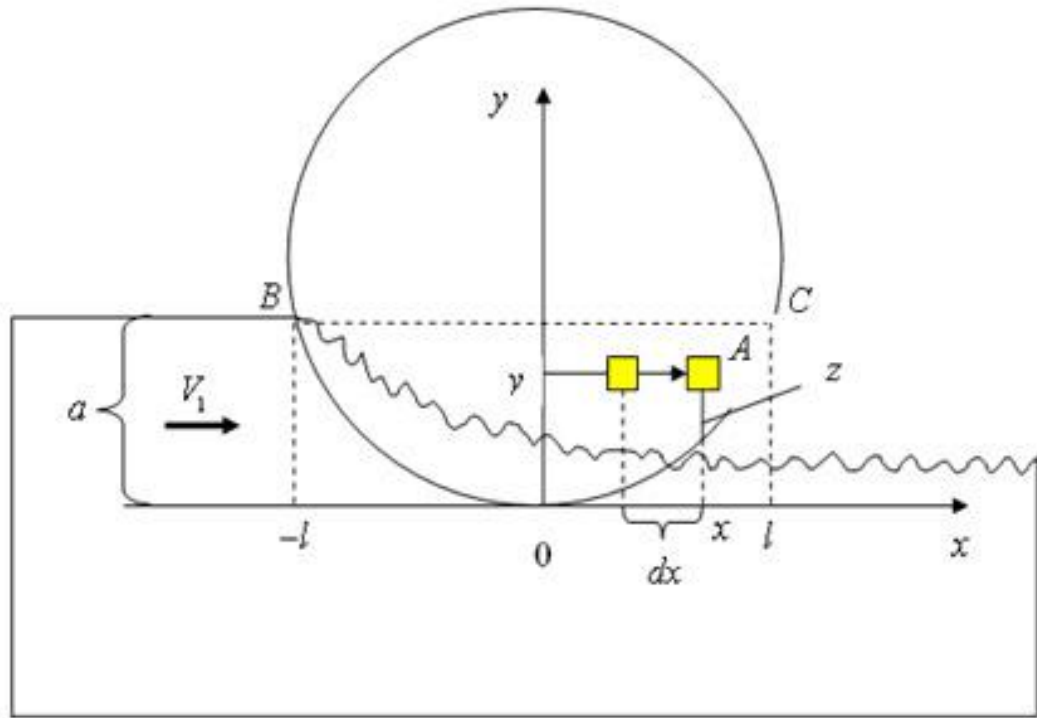


Рисунок 4.4 Расчетная схема контакта шлифовального круга с заготовкой

За малый интервал времени dt элемент А на рисунке 4.4 вследствие подачи перемещается на расстояние $dx = V_1 dt$. При этом если он оказался несрезанным в точке $(x + V_1 dt, y)$, то это означает, что во - первых, он был не срезан уже в точке (x, y) и, во - вторых, при движении на интервале dx он также не был срезан. В силу независимости этих событий

$$P(x + V_1 dt, y) = P(x, y)(1 - qdt) \quad (4.4)$$

где qdt - вероятность срезания элемента за время dt .

Обозначая через S ширину вершины абразивного зерна (рисунок 4.5), вероятность срезания элемента А одним абразивным зерном можно представить в виде S/H , где H - высота круга.

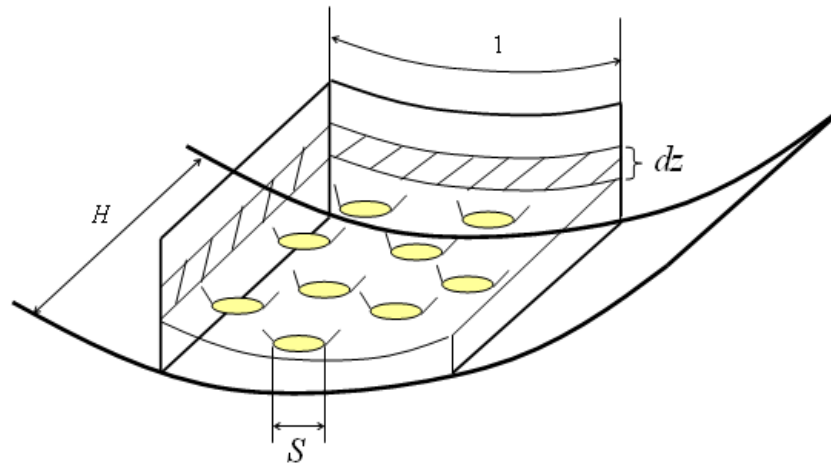


Рисунок 4.5 Вершины зерен в слое dz шлифовального круга

Число зерен, проходящих за время dt через сечение, в котором лежит точка, равно $dk = NzVdt$, где N - число вершин зерен в единице объема; V - скорость резания; $z = y - x^2 / D_e$ - расстояние от точки А до наружной поверхности шлифовального инструмента, проходящей через наиболее выступающую кромку; $D_e = 2rD / (2r \pm D)$ - эквивалентный диаметр круга; r - радиус кривизны поверхности детали; D - диаметр круга. Знак "+" относится к шлифованию спинки лопатки, "-" - к шлифованию корыта. В силу независимости действия абразивных зерен имеем:

$$1 - qdt = (1 - S / H)^{dk} \quad (4.5)$$

Вероятность срезания точки А в единицу времени равна $q = NzVS$.
Уравнение для функции распределения вероятностей

$$\frac{dP}{dx} + \frac{NSV}{V_1} \left(y - \frac{x^2}{D_e} \right) P = 0 \quad (4.6)$$

Интегрируя это уравнение по траектории точки А в пределах $|x| \leq l = \sqrt{D_e a}$ с учетом граничных условий $P(x, y)|_{0B} = 1$ и $P(x, y)|_{0C} = P_0(y)$

получим распределение вероятностей наличия неудаленного материала на обработанной поверхности в виде:

$$P_0(y) = \exp(-(y/h)^{3/2}), \quad (4.7)$$

где величина

$$h = (3V_1 / 4NSV \sqrt{D_e})^{3/2} \quad (4.8)$$

задает масштаб шероховатости.

Интегрируя по частям в выражениях (4.6) с учетом зависимостей $dF / dy = f(y)$, выразим среднеарифметическую высоту неровностей через распределение $P_0(y)$ в виде:

$$Ra = 2 \int_M^\infty P_0(y) dy; M = \int_0^\infty P_0(y) dy, \quad (4.9)$$

откуда находим среднеарифметическую высоту неровностей при шлифовании:

$$Ra = 0.40(V_1 / NSV \sqrt{D_e})^{3/2} \quad (4.10)$$

В целом, в настоящем разделе предложен принцип синергетического подхода к изучению процессов механической обработки с применением дополнительной энергии как база для выполнения дальнейших работ.

4.4 Математическая модель формирования микротвердости при ультразвуковой отделочно-упрочняющей обработки

Учитывая связь напряжения с микротвердостью материала в виде [7]

$$\sigma_i = kH_\mu, \quad (4.11)$$

где k – коэффициент пропорциональности (0,33...0,4).

С учетом ранее полученных зависимостей, устанавливающих связь напряжения и плотности дислокаций с учетом безразмерного параметра Π получим следующее выражение для расчета микротвердости поверхности

$$H_\mu(h) = \left((1 + K_\sigma) \left(\frac{\alpha}{k} \right) K_M G g(h) \right) \left(1 - \exp \left[- \frac{\Pi}{g(h)} \right] \right). \quad (4.12)$$

Принимая в (4.12) $g(h) = 1$, получим формулу для расчета твердости поверхности после ультразвуковой обработки

$$H_\mu(0) = \left((1 + K_\sigma) \left(\frac{\alpha}{k} \right) K_M G \right) \left(1 - \exp \left[- \Pi \right] \right). \quad (4.13)$$

Учитывая связь плотности дислокаций с величиной пластической деформации в виде известного из теории дислокаций соотношения $\varepsilon = b\rho\lambda$, где λ – длина свободного пробега дислокацией между актами размножения ($\lambda \approx 1/\sqrt{\rho}$), получим выражение для расчета величины накопленной пластической деформации

$$\varepsilon_\mu(h) = \left((1 + K_\sigma) \left(\frac{\alpha}{k} \right) K_M G \right) \left(1 - \exp \left[- \frac{\Pi}{g(h)} \right] \right). \quad (4.14)$$

При $g(h) = 1$ из (4.14) формула для расчета накопленной пластической деформации в приповерхностном слое имеет вид

$$\varepsilon_n(0) = \left(+ K_\sigma \right) \left(- \exp \left(- \Pi \right) \right). \quad (4.15)$$

Таким образом, на основании анализа физических закономерностей развития дефектной структуры в поверхностном слое, учета кинетики дефектообразования в ходе интенсивной пластической деформации, основных положений теории дислокаций и термодинамики неравновесных процессов разработаны математические модели позволяющие описать с единой позиции процесс дефектообразования при внешнем воздействии концентрированными потоками энергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Системный анализ состояния использования гибридных (комбинированных) технологий механической обработки металлических и керамических материалов с использованием дополнительной энергии ультразвукового поля показывает, что эти технологии обладают рядом преимуществ перед традиционными монотехнологиями. Основные из этих преимуществ можно свести к следующим:

1. Резкое повышение производительности обработки. Увеличение производительности при переходе от монотехнологии к комбинированной обработке может составить от нескольких процентов до нескольких раз.

2. Повышение качества обработки с меньшими удельными затратами. Нередки случаи, когда добиться заданного качества только за счет совершенствования условий механической обработки бывает невозможно или экономически невозможно даже при правильном применении данного типа механообработки.

3. Возможность обработки труднообрабатываемых металлических и керамических материалов, традиционная монотехнология обработки которых была бы весьма проблематичной.

Указанные преимущества – высокая производительность обработки, высокое качество обработки и возможность обработки труднообрабатываемых материалов – позволяют утверждать, что гибридные (комбинированные) технологии находятся на перспективном направлении развития технологической науки и производства.

В то же время можно отметить ряд недостатков комбинированных (гибридных) технологий, не устранив которые трудно добиться указанных выше преимуществ их перед монотехнологиями. К таким недостаткам можно отнести дополнительный расход энергии.

1. Дополнительная энергия подается в зону обработки в виде концентрированных потоков, что требует от источников энергии большой

мощности, зачастую превосходящую мощность, потребную для основного вида обработки. Дополнительная энергия – механическая, акустическая, тепловая, химическая, электрическая, магнитная – требует дополнительных затрат, сопредельных с затратами на основную обработку, а иногда и превосходящих их. Все это часто делает комбинированную обработку экономически нецелесообразной.

2. Отсутствие точного математического описания физико-химических процессов, протекающих в микрообъемах поверхностного слоя и способствующих формирования показателей качества обработки.

К недостаткам комбинированных (гибридных) технологий следует также отнести слабую изученность процессов комбинированной обработки материалов как у нас в стране, так и за рубежом. Недостаточно изучены, либо практически вообще оставленные без внимания также аспекты гибридных технологий такие как:

1. Выбора оптимальной мощности дополнительного потока концентрированной энергии.

Мощность источника должна быть лимитирована как технологическими, так и экономическими ограничениями. С одной стороны, повышение мощности источника, как правило, ведет к повышению производительности обработки. С другой стороны повышение мощности требует дополнительных затрат. Возникает противоречие, разрешить которое можно на базе всестороннего анализа. Однако методика такого анализа на сегодня отсутствует. Кроме того, для такого анализа необходимо теоретическое обоснование и данные специальных экспериментов по оценке степени влияния различных параметров комбинированной обработки (в том числе и мощности источника) на показатели обработки. Ни теоретического анализа, ни данных экспериментов на сегодня крайне недостаточно.

2. Определение оптимальных параметров комбинированной обработки. К таким параметрам относятся вид дополнительной энергии и спо-

соб ее подвода, мощность источника энергии, режим подачи дополнительной энергии.

Следует отметить, что введение дополнительного потока энергии потребует назначения и другого режима резания по сравнению с режимом монотехнологий.

Для определения оптимальных параметров комбинированной обработки необходима ее математическая модель в виде системы технических ограничений и целевой функции. Техническими ограничениями в модели должны стать предельные (минимальные или максимальные) значения показателей обработки, таких как точность, шероховатость, силы, температура, качество поверхностного слоя, стойкость инструмента, технические возможности оборудования и т.п. Эти ограничения должны быть выражены в виде системы уравнений и неравенств, в левой части которых должны быть представлены искомые параметры обработки, а в правой – предельные значения ограничивающих факторов. В качестве целевой функции может быть принят какой-либо экономический критерий – производительность обработки, себестоимость операции и т.п. Решая модель с помощью специальных программ на ПК, относительно искомых параметров левой части неравенств, можно найти значения параметров, обеспечивающих экстремальное значение принятого критерия (например, максимальную производительность обработки) при выполнении всех требований технических ограничений.

Для разработки такой модели нужны экспериментальные данные по определению влияния каждого из параметров на каждый из показателей комбинированной обработки в виде коэффициентов – показателей степени для каждого из параметров. Таких моделей, на сегодня обнаружить не удалось. Что касается базы данных в виде значений коэффициентов и показателей степени в записях технических ограничений и целевой функции, то они могут быть получены только в результате экспериментов. Таких экспериментов на сегодня проведено крайне мало, а результатов, сведенных в

общую математическую модель процесса на сегодня обнаружить не удалось.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Хакен Г. Синергетика. М.: Мир, 1980. 406 с.
2. Хакен, Г. Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам: Пер. с англ. / Предисл. Ю.Л. Климонтовича. Изд. 2-е, доп. М.: Ком Книга, 2005. – 248 с.
3. Haken H. Principles of Brain Functioning. A Synergetic Approach to Brain-Activity, Behavior and Cognition Berlin: Springer, 1996, p.256.
4. Хакен, Г. Синергетика. Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. – М.: Мир, 1985. 411 с.
5. Хейфец, М.Л. Проектирование процессов комбинированной обработки. / М.Л.Хейфец- М.: Машиностроение. 2005.- 272 с
6. Хейфец, М.Л. Пути повышения эффективности процессов формирования поверхностей с позицией синергетики./ М.Л. Хейфец. //Вестник машиностроения.1994.№2 С.22-25.
7. Кабалдин, Ю.Г. Синергетика. Информационные модели самосборки наносистем и наноструктурирования материалов при внешнем механическом воздействии. –Комсомольск-на-Амуре:КнАГТУ 2007. 187 с.,
8. Бровер, А.В. Самоорганизация поверхностных слоев металлических материалов при обработке концентрированными потоками энергии /. Бровер А.В., Дьяченко Л.Д// Упрочняющие технологии и покрытия – 2007 - № 3 – С.8 – 14.
9. Хейфец, М.Л. Проектирование оптимальных видов обработки резанием на основе самоорганизации трибоконтактных процессов / М.Л. Хейфец // Трение и износ - № 3 – – С. 545 – 554.
10. Хейфец, М.Л. Исследование термодинамических неустойчивостей в процессах механической обработки. 1. Общее решение математической модели. / М.Л. Хейфец // Инженерно-физический журнал, 67 – 1994 - № 1-2 – С.141 – 145.

11. Талантов, Н.В. Физические основы процесса резания / Н.В. Талантов // в сб. Физические процессы при резании металлов. – Волгоград: изд.-во Волгоградского политехнического института – 1984. – С. 3 – 37.
12. Олемской, А.И. Синергетическая теория деформации и отжига ГЦК - кристаллов / А.И. Олемской, Н.И. Главатская // Проблемы нелинейной нелинейной механики деформируемого твердого тела. - Свердловск, Ур. отд. АН СССР. – 1990 – С.124 – 132.
13. Бершадский, Л.И. Структурная термодинамика трибосистем / Л.И. Бершадский. – Киев: Знание, 1990. – 253 с.
14. Гершман, И.С. Реализация диссипативной самоорганизации поверхностей трения в трибосистемах / И.С. Гершман, Н.А. Буше // Трение и износ. – 1995. – Т.16, № 1. – С.61-70.,
15. Пригожин, И. Современная термодинамика / И. Пригожин, Д. Кондипуди – М.:Мир, 2002. – 461 с.
16. Машков, Ю.К. О структурно-энергетическом механизме развития металлополимерных трибосистем / Ю.К. Машков, Л.Н. Поцелуева // В кн. Долговечность трущихся деталей машин. Вып. 3. под ред. Д.Н. Гаркунова – М.: Машиностроение – 1988. – 271 с.
17. Польцер, Г. Внешнее трение твердых тел, диссипативные структуры, самоорганизация / Г. Польцер, В. Эбелинг // В кн. Долговечность трущихся деталей машин. Вып. 3. под ред. Д.Н. Гаркунова – М.: Машиностроение – 1988. – 271 с.
18. Алексеев, Н.М. О самоподобии процесса трения и изнашивания на различных масштабных уровнях / Н.М. Алексеев, Н.Н Кузьмин, Г.Р. Транковская, Е.А. Шувалова // Трение и износ (13) – 1992 - № 1 – С. 161 – 171.
19. Грипачевский, А.Н. Самоорганизация вторичных структур при трении меди и бронзы по стали / А.Н. Грипачевский, А.В. Верещак, В.В. Горский // Трение и износ – 1992 – № 4 – С. 647 – 653.
20. Шапиро, А.М. Механизмы временной самоорганизации изнашивания / А.М, Шапиро // Трение и износ – 1990 – № 3 – С. 401 – 408.

21. Мигранов, М.Ш. Интенсификация процесса металлообработки на основе использования эффекта самоорганизации при трении / М.Ш. Мигранов, Л.Ш. Шустер – М.: Машиностроение, 2005. – 202 с.,
22. Мигранов, М.Ш. Исследование изнашивания инструментальных материалов и покрытий с позиции термодинамики и самоорганизации / М.Ш. Мигранов // Известия вузов. Машиностроение – № 11 – 2006. – С.65 – 70.
23. Кабалдин, Ю.Г. Структурно – энергетический подход к процессу изнашивания режущего инструмента / Ю.Г. Кабалдин // Вестник машиностроения – 1990. – № 12 – С. 62 – 68.
24. Коршунов, В.Я. Обеспечение качества поверхностного слоя деталей на основе прогнозирования рациональных структурно-энергетических параметров материала и технологических условий механической обработки / В.Я. Коршунов. Дисс. доктора технических наук – зерноград – 2006 г. – с.407
25. Поляков, С.А. Механизмы деформации приповерхностных слоев металлов и возможность самоорганизации в этих процессах / С.А. Поляков, Л.И. Куксенова // Проблемы машиностроения и надежности машин – № 4 – 2006. – С.51 – 61.
26. Панин, В.Е. Структурные уровни деформации твердых тел / В.Е. Панин, В.А. Лихачев, Ю.В. Гриняев.- Новосибирск: Наука – 1985, 230 с.
27. Пинчук, В.Г. Структурные особенности микропластической деформации поверхностных слоев металла при трении на этапе приработки поверхностей / В.Г. Пинчук // Трение и износ – 1996 – № 4 – С. 487 – 490.
28. Чумаченко, Е.Н. Сверхпластичность: материалы, теория, технологии / Е.Н. Чумаченко, О.М. Смирнов, М.А. Цепин, М.: УРСС, 2005. – 320 с.
29. Кабалдин, Ю.Г. Наноструктурирование металлических материалов при усталостном нагружении / Ю.Г. Кабалдин // Вестник машиностроения – 2008 – № 6 – С. 43 – 48.
30. Конева, Н.А. Накопление дефектов, запасенная упругая энергия и самоорганизация субструктуры / Н.А. Конева, Д.В. Лычагин, Л.И. Гришкина,

- Э.В. Козлов // Физические аспекты прогнозирования разрушения и деформирования гетерогенных материалов. Л.:1987. – С.20 – 35.
31. Конева, Н.А. Дислокационные субструктуры и их трансформация при усталостном нагружении (обзор) / Н.А. Конева, Л.А. Теплякова, О.В. Соснин и др. // Изв. Вузов. Физика. – 2002 – № 3 – С. 87 – 98.
32. Терентьев, В.Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов / В.Ф. Терентьев. – М.: Интермед Инжиниринг, 2002. – 288 с.
33. Терентьев, В.Ф. Эволюция структуры при усталости металлов как результат самоорганизации диссипативных структур / В.Ф. Терентьев // Синергетика и усталостное разрушение металлов. –М.: Наука, 1989. – С. 78 – 87.
34. Klamecki, В.Е. A Thermodynamic Model of Friction / В.Е. Klamecki // Wear – №2 – 1980. – 113 – 120.
35. Климонтович, Ю.Л. Проблемы статистической теории открытых систем: критерии относительной степени упорядоченности состояний в процессах самоорганизации / Ю.Л. Климонтович // Успехи физических наук – № 1. – 1989. – С.59 – 91.
36. Барац, Я.И. Финишная обработка металлов давлением: Теплофизика и качество / Я.И. Барац. –Саратов: изд-во Сарат. ун-та, 1982, 164с.
37. Панин, В.Е. Сильно возбужденные состояния в кристаллах / В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин, Н.Е. Савушкин, Ю.. Хон // Изв. Вузов. Физика. – 1987. - № 1 С. 9 – 34.
38. Троицкий, О.А. Физические основы и технология обработки современных материалов. / О.А. Троицкий, Ю.В. Баранов, Ю.С. Аврамов, А.Д. Шаляпин. В 2-х томах. Т. 1.- М. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. - 590 с.
39. Combined physico-chemical treatment: synergetic aspects / А.І. Gordienko, М.І. Kheifetz, L.M. Kozhuro et al. - Minsk: Technoprint, 2004. 200 p.

40. Вагапов, И.К. Нелинейные эффекты в ультразвуковой обработке. – Минск: Наука и техника, 1987. – 159 с.
41. Тяпунина, Н.А. Поперечное скольжение дислокаций в ультразвуковом поле и влияние на этот процесс амплитуды и частоты ультразвука, ориентации образца и коэффициента динамической вязкости / Н.А. Тяпунина, Г.В. Бушуева, М.И. Силис, Д.С. Подсобляев и др. // Физика твердого тела. – Т. 45. – Вып. 5, 2003 – С. 836 – 841.
42. Полухин, П.И. Физические основы пластической деформации / П.И. Полухин, С.С. Горелик, К.М. Воронцов. – М.: Металлургия, 1982. – 584 с.
43. Физика и техника мощного ультразвука. В 3-х томах. Том 3. Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1970. – 266 с.
44. Теоретические основы поверхностного пластического деформирования. /Под ред. В.И. Беляева. – Минск: Наука и техника, 1988. 184 с.
- 45 Папшев, Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием / Д.Д. Папшев. – М.: «Машиностроение», 1978, 152 с.
46. Новиков, И.И. Теория термической обработки металлов/ И.И.Новиков– М.: Металлургия, 1978- 389 с.
- 47 Тофпенец, Р.Л. Физические основы термоциклической обработки стареющих сплавов./ Р.Л.Тофпенец, И.И., Шиманский, А.Г Анисович, А.Д. Грешилов– Минск: Наука и техника, 1992- 190 с.
48. Берштейн, М.Л Термомеханическая обработка стали. /М.Л.Берштейн., В.А. Займовский , Л.М. Капуткина– М.: Металлургия, 1983- 231 с.
49. Кершенбаум, В.Я. Механотермическое формирование поверхностей трения. /В.Я. Кершенбаум-М.: Машиностроение, 198-. 232 с.
50. Shaping materials with laser / S.Copley, M.Bass, B.Jan, R.J.Wallance // Laser materials processing. North-Holland publishing company: Amsterdam, 1983. P. 299 - 336.
51. Goswami G.Z., Kumar Dilip, Roy P.R. Laser processing of metals and

- sSloys. Bpmbey: Bhaba atomic research centre, 1988.192 p.
52. Fedoseev, O.B. The Effect of Noise on Grinding Cycles. Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 113, November 1991, pp. 474-476.
53. Федосеев, О.Б. Образование дефектного слоя при импульсном нагреве поверхности металла. // ФХОМ, № 5, 1984. - С. 3 - 9.
54. Fedoseev, O.B., Malkin, S. Analysis of Tempering and Rehardening for Grinding of Hardened Steels. // Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 113, Nov. 1991, pp. 388-394.
- 34 Кристиан, Дж. Теория превращений в металлах и сплавах. Пер. с англ. - М.: Мир, 1978. – Часть I. - 808 с.
55. Любов, Б.Я. Кинетическая теория фазовых превращений. – М.: Металлургия, 1969. – 263 с.
56. V. A. Romanova Ж Е. Sopra Ж S. Schmauder, R. R. Balokhonov, Mesomechanical analysis of the elasto-plastic behavior of a 3D composite-structure under tension/Comput Mech (2005) 36: 475–483
57. A mesomechanical ductility model of SiCp/Al composite//Chen Kang-hua, Huang Da-wei, Song Min, LI Xia, Fang Ling/ Vol. 13 No. 4 J. cent. south univ. technol. Aug. 2006
58. Modelling and simulation of the localized plastic deformation by relaxation element method/Ye. Ye. Deryugin · G. V. Lasko · S. Schmauder/Comput Mech (2007) 40:791–801
59. Numerical investigation of dynamic shear bands in inelastic solids as a problem of mesomechanics Adam Glema · Tomasz Łodygowski · Piotr Perzyna/Comput Mech (2008) 41:219–229.
60. Trans-scale mechanics: looking for the missing links between continuum and micro/nanoscale reality//Y. L. Bai · H. Y. Wang · M. F. Xia · F. J. Ke/Acta Mech Sin (2008) 24:111–126