

ЗАКОНОМЕРНОСТИ САМООРГАНИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИОННОГО ДВИЖЕНИЯ И РАСЧЕТНЫЙ МЕТОД ДЛЯ ЕГО АНАЛИЗА

Макушок Е.М.

We analyze the principles of designing information technology capable of simplifying training production, preparation, optimization of deformation processes. This is achieved due to introduction of a mechanics paradigm that takes into account the self-organization principle of deformation processes. This paradigm allows to construct the calculation system based not on the elementary volume equilibrium but on the equilibrium of areas, basic elements, whose state is determined by the specificity of deformation laws (elasticity, plasticity, elasto-plasticity, etc.) that are realized within their limits, and rules of their mutual influence in simultaneous deformation.

Теоретические основы процессов формообразования базируются на механике твердого деформируемого тела (ниже – механика) с привлечением смежных дисциплин, главным образом физического характера. В прикладных технологических дисциплинах доминирует эмпирический уровень знаний.

При относительной ясности экспериментальной основы трудности теоретического описания деформационных процессов привели к тому, что эта наука не столько ориентировалась на путь от простого к сложному, сколько в обратном направлении – к предельному упрощению сложных ситуаций. И это в то время, когда практическая технология осваивала все новые и новые процессы. Роль основополагающих гипотез играло не уточнение механизмов деформационного движения, а допущения и ограничения, позволяющие построить, да и то только в некоторых простых случаях, более или менее складные теории процессов в узких интервалах параметров. Обычно же процессы деформирования имеют сложную многоплановую структуру, и в числе других проблем возникает необходимость выявления структуры слагающих элементов, представляющих собой элементарные процессы, из которых комбинируется сложный анализируемый ансамбль, называемый напряженно-деформированным состоянием.

По этому поводу можно отметить, что в литературе сплошь и рядом встречается мнение о том, что задачи механики чрезвычайно сложны, а ее математический аппарат не адекватен физической сложности процессов. Возможно, эта категория процессов действительно самая сложная с физической точки зрения. Хотя сравнивать по сложности изложения различные физические явления вроде бы нелогично, но относительно исходного элемента самоорганизации деформационных процессов можно отметить, что нагрузкой обычно мы создаем поле нормальных напряжений, а деформация (упругая, пластическая, вязкая) происходит в поле сдвигающих напряжений. Если же нагрузку мы создаем сдвигающей силой (например, активной силой трения), то это вызывает появление поля нормальных напряжений, которое преобразуется в поле сдвигающих напряжений, вызывающее соответствующее формоизменение вплоть до изменения характера массопереноса. Отсюда, как это ни парадоксально, возникает определенное упрощение ситуации, состоящее в том, что совокупность поверхностей сдвига, пронизывающих весь объем тела, является естественной системой координат, в которой реализуются деформационные процессы. Так возникают поля напряженно-деформированного состояния (кратко – механическое поле). В связи с этой особенностью мы должны отметить выдающийся вклад М.Фарадея в создание основ механики деформируемых тел, поскольку он ввел в науку понятия поля и силовой линии. Именно это в числе прочего стало объектом и средством аналитического исследования напряженно-деформированного состояния механических процессов. Эти понятия стимулируют исходные положения и удерживают ход решения в определенных рамках.

Однако сложившееся затруднительное положение механики вызвано не столько сложностями расчетных ситуаций, сколько укоренившимися искаженными представлениями о напряженно-деформированном состоянии как упрощенной системе, которую можно описать

от одного уровня – от исходного состояния элементарного объема, свойства которого распространяются сразу на весь объем очага деформации независимо от сложности ситуации. Этот однопараметрический континуальный подход, выражаемый через постоянный предел текучести, съедает многие нюансы поведения реального деформируемого тела, проявляющиеся на разных уровнях строения вещества, и порождает источники несоответствия математических моделей их физическому содержанию. Несоответствие физических явлений и математических моделей их описания является болезненной проблемой развития науки, призванной повысить свои информационные возможности. Здесь мы в реальном масштабе сталкиваемся с обострением проблемы несоответствия теоретических посылок и реальности на макро-, микро-, наноуровнях и других уровнях, формирующих прочностные параметры.

Все же первые успехи в развитии теоретических представлений были получены, когда сформировались понятия о модели идеально пластичного тела, и появилось первое представление о макрометоде развития пластического течения исключительно деформацией сдвига, постоянство сопротивления которому распространялось на весь очаг деформации. Особенности, порожденные этим одноплановым подходом, довольно быстро привели теоретическое описание если не в тупик, то к исчерпанию возможностей дальнейшего развития.

Возникновение теории пластичности неоднородных тел не явилось решающим толчком в развитии теории, поскольку декларировалось распределение исходной неоднородности, а реально она появляется в процессе деформирования. Отметим также, что одноплановый подход формально не включает в себя привлечение системы наук. Системный подход учитывает одновременное проявление нескольких реологических признаков (пластичность, вязкость, упругость и т.п.), однако не включает в себя влияние на ситуацию разных уровней строения вещества (голографический подход). В последнем случае из анализа выпадают одновременное и последовательное проявление разномасштабных механизмов деформационного движения. Ниши голографического подхода: первый уровень – макроуровень (деформируемое тело в целом или по элементам, очаги деформации, переходные области, взаимосвязи, проявляющиеся между ними при совместном деформировании); второй уровень – зеренное строение (микроуровень), включающий зерна, микрометоды развития внутри- и межзеренной деформации; третий – наноуровень (атомарные уровни механизмов деформирования: точечные, линейные дефекты, дислокации, поверхностные и локальные механизмы диффузионного характера) и уровни более высокого порядка, обращение к которым становится необходимым, когда речь идет о фактической прочности, об эксплуатационных свойствах, о технологической наследственности, о надежности, долговечности и износостойкости. Необходимо также рассматривать возникновение элементов разрушения в качестве механизмов деформационного процесса. Упомянутый перечень того, что нужно учесть в деформационной теории, не должен рассматриваться как набор непреодолимых препятствий, как неразрешимая проблема на пути поиска обобщений. Потенциальные возможности всеохватывающего анализа заключаются в том, что Природа в своей основе проста и едина. Применительно к механике деформируемого тела сравнительно небольшое число элементов реологического поведения порождает огромное разнообразие их проявлений. Отсюда со всей очевидностью следует сделать вывод о том, что важнейшим элементом развития рассматриваемой супертеории становится установление взаимного влияния многочисленных закономерностей деформирования, проявляющихся на разных уровнях строения вещества в конкретных, опять же самоорганизующихся условиях их совместного протекания на разных уровнях формирования структуры напряженно-деформированного состояния. При этом в усложняющихся случаях, вследствие прогрессирующего развития неоднородности сопротивления деформированию, возникают области вторичного деформированного состояния, влиянием которых уже нельзя пренебречь.

Для решения этой проблемы неоднородности необходимо уловить внутреннюю простоту напряженно-деформированного состояния и отобразить ее в расчетной системе в пол-

ноте, характеризуемой инженерной достаточностью, т.е. в полноте, необходимой для расчета без обращения к эксперименту. Более того, с этой целью необходимо несколько преобразовать характер математического описания.

Возможность решения этой проблемы возникла на основе новой общей методологии науки, получившей название синергетики (самоорганизации). Принципиально концепция самоорганизации в обсуждаемой области технологических процессов основывается на дополнительном принципе механики, принципе самоорганизации деформационных процессов [1,2]. Состоит он в том, что деформационный процесс макротела представляет собой специфическую реакцию на нагрузку. При этом уже на континуальном уровне обсуждения тело самопроизвольно разбивается на очаги деформации и переходные области, в которых преимущественно проявляются законы пластичности, упруго-пластичности, упругости. Между ними возникают явления взаимосвязи, закономерности которых квалифицируются как законы самоорганизации, определяющие в меру своего влияния общую, физически обоснованную, кинематику деформируемого тела и связь между условиями деформирования и сопротивлением деформации. Итак, реакция на нагрузку вызывает определенную структуру неоднородности напряженно-деформированного состояния, которая вполне определена на континуальном уровне и реагирует на исходную и развивающуюся анизотропию свойств. Контактное трение в этих условиях анализа также является самоорганизующимся элементом системы нагружения. Оно не задается как граничное условие, а возникает и трансформируется по ходу процесса. Контактное трение описывается той же теорией, что и деформация тела [3]. В общем случае спецификой трения является трехмерность локального контакта, что также в некоторых случаях может преобразовывать общую кинематику деформационного процесса, в частности, за счет образования зон обтекания.

Переход к парадигме самоорганизации сразу уже по формулировке вызывает необходимость уточнения или введения еще не установленных или не учитываемых механизмов деформационного движения и помогает выявлять дополнительные связи и представлять их в форме критериев самоорганизации или взаимовлияния. Эта парадигма позволяет сменить не только идеологию науки, но и придать ей необходимую для инженерной практики разрешающую способность, связать физические и технологические параметры процессов, установить их влияние на эксплуатационные свойства. Обновление парадигмы – это острейшая, но уже разрешимая проблема современной деформационной теории. Совокупность решений на основе концепции самоорганизации представит собой новую информационную технологию. Развитие механики в этом направлении будет способствовать отказу от эмпирического уровня в современной технологической науке вообще, в области металлообработки и кузнечно-штамповочного производства в частности.

Как практически можно реализовать возможности новой парадигмы в системе анализа технологических процессов? Анализ каждого процесса развивается от предельно упрощенной однопараметрической реперной модели процесса. В ней необходимо использовать простейшую реологическую модель – опять же идеально пластичное тело ($\sigma_s = const$) – и на ее основе установить исходные реперные параметры процесса. Эта стадия решения составит скелет (основу) последующего его развития ($\sigma_s \neq const$).

Предоставление идеально пластичному телу статуса исходной реперной модели имеет в виду не только пренебрежение упругой составляющей (жестко – пластичное тело) и постоянство предела текучести, что является определением модели. Дополнительными свойствами, определяющими привлечение этой модели, являются прежде всего органическое соответствие понятия жестко-пластической модели условию отвердевания. По этому условию в механике накладываются дополнительные связи, которые сковывают деформационное движение. А в данном случае их не нужно вводить, так как предел текучести одинаков как при предельном переходе, так и в состоянии течения на любой стадии. Уже только из-за этой причины решение идеальной пластичности может перейти в упругое с использованием упру-

гих параметров в любой точке очага деформации. Идеально пластичная модель обладает и другими замечательными свойствами, в частности, постоянство предела текучести может трактоваться как характеристика реперной точки зависимости предела текучести от количества возможных направлений сдвига, отвечающей их любой ориентации.

От исходной реперной модели решение переходит в усложняющуюся модель, которая последовательно вовлекает в рассмотрение новые влияющие параметры. При этом решение задачи становится многопараметрическим. Каждое решение на основе учета самоорганизации можно и следует рассматривать на всем интервале изменения параметров, а не в точке (при заданном обжатии). В силу этого каждое достаточно полное решение превращается в изложение теории процесса. Стыковка решений простых процессов дает решение для комбинированных и далее для все более сложных комбинаций. Наслоение процессов продолжается с сохранением принципа самоорганизации на всех этапах усложнения задачи исследования и на всех этапах введения (изменения) механизмов деформационного движения. Напомним, что неучет одного из элементов деформационного движения снижает точность решения за счет его влияния на напряженно-деформированное состояние в целом. Это совершенно естественно, поскольку речь идет о решении задачи на аналитической основе. В то же время не отрицается возможность построения критериев самоорганизации на экспериментальном материале, в том числе по литературным (даже старым) источникам и просто по соображениям логики.

Таким образом, самоорганизация неоднородных деформационных процессов представляется в нашем исследовании своеобразным многофакторным физическим явлением, координирующим напряженно-деформированное состояние системы в целом и всех ее элементов в частности. При этом следует иметь в виду, что всякое развитие неоднородного деформационного процесса связано с появлением неоднородности структурного состояния и ее показателя – сопротивления деформированию (упрочнение – разупрочнение). Всякая дополнительная неоднородность возбуждает вторичные поля напряженно-деформированного состояния, влияние которых следует анализировать на тех же принципах самоорганизации. Безусловно, что это координирующее физическое явление подлежит всестороннему исследованию и обобщению.

Концепция самоорганизации реализуется не только в том, что она декларирует возникновение специфических структур напряженно-деформированного состояния и призывает обратить внимание на это физическое явление синергетики при формулировке и решении технологических задач, но она в принципе меняет суть использования математического аппарата.

Решение напряженно-деформированного состояния от исходной системы дифференциальных уравнений равновесия и уравнения сопротивления в пределах элементарного объема оказывается возможным только для простейших моделей деформируемых тел, прежде всего для модели идеально пластичного тела ($\sigma_s = const$). Для более развитых моделей тел, характеризующихся кривыми деформационного упрочнения, этот путь анализа оказывается неприемлемым, так как он не обладает свойством достаточности. Это обстоятельство с математической стороны объясняется отсутствием в системе дифференциальных уравнений необходимой информации о связи состояния элементарного объема с полем напряженно-деформированного состояния в целом. Попытка универсализации решения приводит либо к необходимости распространения условия состояния на весь очаг деформации, либо к необходимости знания неоднородности состояния во всем объеме, что достижимо, если задача уже решена со всеми подробностями.

Возникновение ситуации недостаточности исходной информации происходит и по другим, уже физическим, причинам, прежде всего в силу двухуровневого перехода от напряженного состояния к деформированному. Каждый элемент тела участвует одновременно в движении собственного деформирования (деформируется сам по себе) и переносного (под

влиянием напора других элементов), соответствие между которыми определяется общим полем напряженно-деформированного состояния. В то же время относительное упрочнение одного элемента тормозит развитие его собственной деформации и увеличивает деформированность соседних элементов в общем потоке переносного деформирования. Эта физически вынужденная взаимосвязь элементов, учитывающих одновременно два эти движения, не отражается в рамках элементарного объема (по условию он деформируется равномерно). Чтобы выйти за рамки этого противоречия, необходимо увеличить объем элемента (отойти от бесконечно малого) и рассматривать равновесие в рамках автономных областей и их элементов, учитывающих неоднородность анализируемых процессов в целом. С учетом сказанного можно констатировать, что модель идеально пластичного тела может правильно определять процесс только тогда, когда упрочнение отсутствует ($\sigma_s = const$). В силу отмеченных специфических следствий этой закономерности она рассматривает только переносное движение (кроме особых случаев, когда контактное трение равно нулю или им можно пренебречь). В то же время она обладает рядом замечательных свойств. Она указывает путь определения границ очагов деформации и жестких областей, которые при условии $\sigma_s \neq const$ трансформируются в переходные области. Она же определяет стыковку полей линий (поверхностей) скольжения с контактной поверхностью и полем напряжений в инструменте, обладает и другими полезными свойствами. И это предопределяет необходимость использования в реперном решении задачи модели идеально пластичного тела. Решение методом усложняющейся модели (усложнение за счет последовательного введения дополнительных параметров – трения, упрочнения, температуры) и расчетным методом базовых элементов (базовые элементы – реологические модели тел, условия деформирования, элементы самоорганизации) доводится до кондиции.

В системе, учитывающей самоорганизацию деформационных процессов, решение от равновесия элементарного объема переводится к решению крупно-блочного характера, в котором за основу принимается равновесие конечных областей и распределение свойств в их пределах в соответствии с локальными и общими закономерностями самоорганизации физически вынужденной кинематики.

Концепция самоорганизации реализуется не только в том, что она переносит решение в координатную систему, образованную поверхностями (линиями) скольжения и позволяет развить решение для континуальной модели. Она позволяет также сделать и другой качественный скачок и вынести неоднородности напряженно-деформированного состояния на уровень структурного строения. Другими словами, она позволяет выйти на уровень анализа влияния структурных элементов строения деформируемого материала – зерен, блоков и т.п., на уровень механизмов деформационного движения в их пределах и механизмов влияния всей системы на эти локальные механизмы. Наши обобщения основываются на детализации неоднородности деформационного процесса в теле в целом (система очагов деформации, переходных областей и т.п.), внутри зерен и на их границах, на использовании механизма деформации монокристаллов, на возникновении новых структурных элементов в процессе накопления неоднородной деформации. Этот подход позволяет уточнить физическую суть механизмов деформационного движения и найти возможность количественной оценки их вклада в процесс деформирования. Каждое зерно в своем гнезде (в рамках своей границы), как и монокристалл, под влиянием кристаллического строения стремится деформироваться плоско (в плоскостях локализации кристаллографического сдвига) с сохранением тенденции зазубривания границ зерен. Однако, находясь в потоке общей деформации, зерно не может реализовывать свой механизм пластичности независимо от других зерен. Деформация сдвига должна быть передана в соседнее зерно через границу и далее. Это осуществляется локальным механизмом взаимного проникновения, механизмом микротвердости (вдавливанием острого клина), который обеспечивает веер возможных направлений сдвига, оставляя нано-

механизмам возможность переноса сдвига через деформирующуюся границу зерна. Пограничный слой между зернами С.И.Губкин [6] характеризовал как зону затрудненной деформации. Наша доработка сводится к конкретизации эстафетного механизма передачи сдвига через границу от одного зерна к другому и оценке сопротивления этому виду движения. Этот механизм не отрицает возможности относительного сдвига зерен (например, в явлении сверхпластичности). Однако решающую роль в упрочнении упрочняемого материала играет именно граница зерен.

Эта ситуация рассматривается нами как возможность приближенного представления деформируемого поликристаллического тела в качестве двухфазной (биметаллической) континуальной системы, отображающей прочностные особенности на границах зерен. Упрочнение этого вида пропадает при температуре рекристаллизации за счет активизации диффузионной подвижности атомов и угасании возможности проявления локальной твердости [5].

Новые представления об упрочнении позволяют уточнить обобщенные кривые упрочнения [6] с выходом на предельно возможные уровни накопленной деформации. Естественно, что вопрос о доминирующей роли дислокаций в деформационном упрочнении поставлен под сомнение [5].

Наконец, концепция самоорганизации неоднородных деформационных процессов позволяет рассматривать как составную часть проблемы деструкцию материалов и вероятность разрушения их в процессах технологии и эксплуатации. Известные теории разрушения кладут в основу наличие изначальных дефектов. Их роль не отрицается, но организованное разрушение в технологических процессах (разделение, снятие стружки) связано с нарушением состояния сплошности и без изначальных дефектов. В частности, астральный механизм эстафетной передачи сдвига через границу зерна, по-видимому, связан не только с лавинообразным механизмом образования дислокаций, но и с локальной потерей устойчивости кристаллической решетки, что способствует образованию зародышей трещин.

На основании изложенного в качестве примера рассмотрим схему аналитического моделирования процесса резания со снятием стружки и последовательность изложения теории этого процесса. Интерес к резанию в данном изложении вызван спецификой неоднородности деформированного состояния. Именно в этом процессе мы сталкиваемся с образованием нароста, представляющего собой присоединенную к резцу массу (область обтекания), предельно упрочненную в этом процессе, которая периодически срывается, возвращая процесс резания и его параметры к начальному состоянию. Исходная реперная модель представляет резание с параметрами: трение на передней грани и передний угол равны нулю; деформируется материал, обладающий свойствами идеально пластичного тела [1,4]. В соответствии с элементарными представлениями теории пластичности в этом случае очаг деформации (плоскость резания) ориентируется под углом $\varphi = \pi/4$ к направлению вектора скорости резания, усадка стружки $\psi = 1$, деформация сдвига в плоскости резания $\Gamma = 2$. Усложнение модели процесса начинается с введения в исходную реперную модель контактного трения. При этом возникает второй очаг деформации сдвига, ориентированный вдоль контактной поверхности. Это обстоятельство уменьшает угол резания, увеличивает усадку стружки, нормальное напряжение, контактную площадку. Эти параметры определяются. Очаг деформации в плоскости резания остается плоским в соответствии с принципом Герца, декларирующим выпрямление линии действия (в данном случае плоскости резания). По сравнению с криволинейным контуром поверхности резания по полю Прандтля (сжатие уступа) при той же усадке стружки нормальное напряжение за счет этого эффекта уменьшается в 1,2 раза. Из этого следует, что поле линий скольжения в плоскости резания следует назвать полем Герца, т.к. в его геометрии доминирует принцип этого автора и плоскость резания отходит от классического направления. Появление некоторой кривизны плоскости резания объясняется влиянием всего деформируемого объема (появлением изгибающего момента). Затем в анализ вводится параметр упрочнения. Исходные соотношения возникают из равновесия на границе упрочненно-

го и неупрочненного материала. Этот параметр, как и предыдущий, уменьшает угол резания, при этом возрастают другие упомянутые геометрические параметры. Влияние упрочнения может быть проанализировано отдельно и совместно с трением на передней грани. Небольшое влияние на усадку стружки и другие параметры оказывает также начальная область кривой упрочнения, которая в пределах переходных областей вызывает вполне определенное распределение приращений деформации (закономерность переходных областей) [1,4].

Принцип самоорганизации предполагает, что решение должно учитывать все нюансы развития деформационного процесса. В частности, при формировании напряженного состояния в плоскости резания следует учесть влияние на сопротивление резанию дополнительно деформационного процесса, возникающего вследствие изменения расстояния между линиями тока на их перегибе при переходе через эту плоскость.

Наибольшие сложности под влиянием локального упрочнения и общей кинематики процесса возникают в области второго очага деформации сдвига, ориентированного вдоль контактной поверхности или поверхности нароста. Прежде всего сосредоточим внимание на особой точке (сечение по режущей кромке). С одной стороны, сдвиг по нормали к плоскости резания (обе плоскости являются главными плоскостями сдвига) в этой локальной области направляет поток на пересечение с передней гранью. С другой стороны, на кромке происходит перелом линии тока, что вызывает резкое проявление инерционных сил (формально давление при перегибе в точке стремится к бесконечности). Проявление инерционных сил (при ускорении и торможении) в представляемой системе рассматривается как механизм упрочнения. Упомянутые кинематические и динамические особенности в окрестности режущей кромки способствуют формированию краудионов (межузельные атомы, объединенные в системы), которые при дальнейшем движении и снятии нагрузки отрывают локальными слоями материал стружки и переносят его на нарост. Именно поэтому нарост не деформируется и не движется по передней грани резца, а растет за счет массопереноса со стороны стружки, что создает иллюзию его движения по передней грани.

С привлечением в расчетную систему процессов обработки металлов давлением принципа самоорганизации и метода базовых элементов открывается возможность снятия многих проблем теории резания, возникает и перспектива ее дальнейшего развития.

Условие пластичности вписывается в систему самоорганизации деформационных процессов. При этом оно теряет признаки двойственности [7]. В числе прочего показано, что определение предела текучести и предела прочности по результатам растяжения стержня не дает точных реперных значений этих параметров для всех путей нагружения. Так, применение параметров, измеренных в осесимметричном процессе (растяжение сплошного круглого стержня), к плоскому деформированию дает погрешность в 3,88%.

Совокупность результатов, полученных на основе использования нового метода, действительно показывает, что применение парадигмы самоорганизации деформационных процессов в сочетании с расчетным методом базовых элементов для анализа формообразования существенно повышает информационные возможности теории деформирования. Расширяются возможности определения параметров процессов аналитическим путем, появляется возможность уточнения механизмов деформационного движения. Полученные результаты в применении единой деформационной теории на примере резания применимы и в анализе других технологических процессов. Так, результаты развития теории поперечной прокатки, где дается анализ взаимовлияния трения скольжения, трения качения и трения скольжения при качении [8], оказались применимыми в фирме "Белтехнология и М", являющейся в настоящее время мировым лидером в области технологий поперечно-клиновой прокатки (максимальный диаметр обработки и снятие ограничений по обжатиям). Ранее была успешно решена проблема определения оптимальных параметров поверхностной пластической деформации роликом (параметров, обеспечивающих максимальный прирост долговечности от этого вида технологического воздействия) на стадии проектирования без обращения к экс-

перименту [9]. Замечательным результатом при оптимальном усилии обкатки стало повышение малоциклового усталости в 3 раза.

Исследование проблемы самоорганизации деформационных процессов в самом широком смысле (в том числе в анализе космических процессов) позволяет сделать вывод о том, что привлечение в эту область неевклидовых геометрий не повышает надежность расчетов, поскольку они уводятся в область кинематически допустимых полей скоростей с частичной потерей физических связей. Нужно считаться с тем, что каждый физический процесс создает свою геометрию, возникающую вследствие самоорганизации движения, и задачей анализа становится выяснение физических особенностей этой геометрии через критерии самоорганизации (поля перемещений, напряжений, скоростей, ускорений и т.п.).

В то же время нужно считаться с тем, что всякое неточное или, тем более, неправильное (основанное на сомнительной гипотезе) допущение, сделанное при формулировании основ теории движения, "самоорганизуется" протекание процессов в искаженном свете. В частности, в теории пластичности некоторые решения основываются на неточном определении роли свободной поверхности. Особенность вызывается представлением общей задачи, составляемой в виде совокупности задач (задачи Коши, Гурса, смешанной). Решение начинается от свободной поверхности (задача Коши). В общем случае эта последовательность возбуждает фиктивную неоднородность напряженно-деформированного состояния и неопределенность решения.

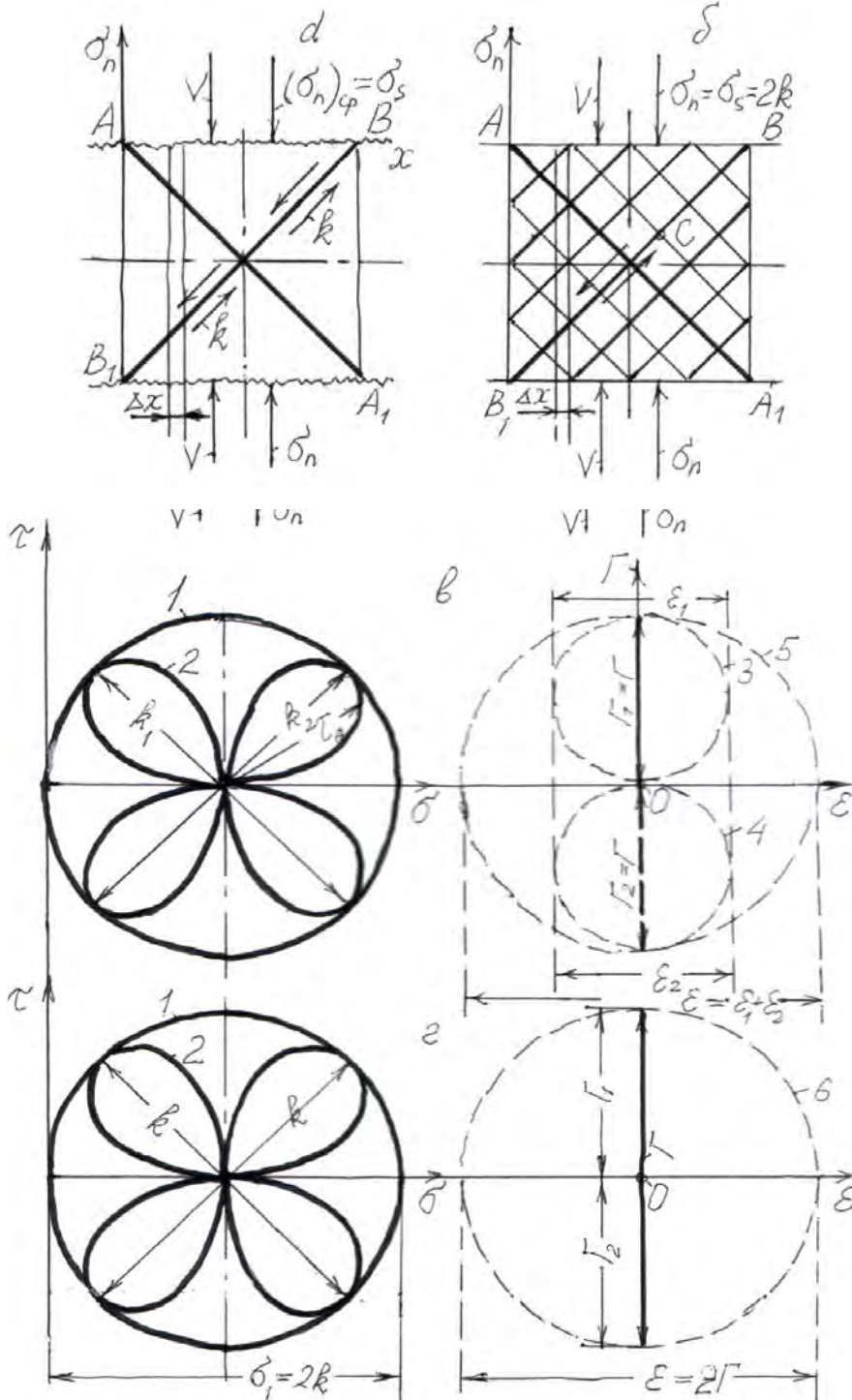
Обращаясь к высказанным ранее авторитетным суждениям о том, что, несмотря на успехи механики деформационных процессов, мы еще не знаем всех ее законов [10], можем отметить, что законы, которых не знает механика, – это прежде всего законы самоорганизации деформационного движения [1,2]. Введение их в расчетную систему раскрывает закономерности, которые ранее не могли быть учтены или объяснены.

Когда в теоретическом анализе возникает проблема учета неоднородности, то в принципе обычно рекомендуется прибегать к системному анализу, к привлечению системы наук, позволяющих выделить неоднородности на макроуровне, например, вместо идеальной пластичности принять развитую реологическую систему, позволяющую включить в анализ влияние соответствующих свойств (упругость, вязкость и т.п.), и к голографическому анализу, позволяющему привлечь соответствующие науки для анализа влияния неоднородности структуры строения на разных уровнях на развитие того же деформационного процесса. Но это очень сложно. Вместо рекомендаций поиска подходов через горы известных, но не систематизированных знаний посоветуем обратиться к той же самоорганизации деформационных процессов и увидеть основы проявления неоднородности уже в исходной реперной модели идеально пластичного тела. Здесь вопрос возникновения и развития неоднородности деформационного процесса проявляется с очевидностью. В случае проявления исключительно пластических свойств нас ожидает вполне четкая особенность, возникающая по причине перехода анализа поведения среды к анализу поведения тела, когда возникает конкретный очаг деформации и выделяются жесткие области. Кроме неоднородности, которая обычно учитывается в связи с трансформацией кривизны линий скольжения [4], возникают и другие виды неоднородности, которые связаны с формированием вынужденной кинематики, способной вызывать неоднородность развития деформационного движения по пересекающимся линиям скольжения. Приведем несколько примеров.

Некоторые особенности описанных ситуаций рассмотрим на элементарном примере сжатия квадратного образца между плоскими плитами, полагая (рис.1), что деформированное состояние любой точки может развиваться только в поле линий скольжения и только с учетом его ориентации. Указанная кинематическая особенность сама по себе является дополнительным механизмом упрочнения – разупрочнения.

Схема возникновения упомянутой неоднородности становится очевидной при сравнении деформированного состояния сжатия квадрата при наличии контактного трения $\tau_k > 0$

(рис.1,а) и без него ($\tau_k=0$) (рис.1,б). Первое поле локализованное, его особенностью является возможность развития сдвига по линиям скольжения 1 и 2, образующим "ковочный крест". Это поле остается одним и тем же не только при условии $\tau_k > 0$, но и при более жестком условии $\tau_k \rightarrow 0$ (кроме $\tau_k=0$). Второе поле ($\tau_k=0$) является однородным, каждая его точка деформируется так же, как тело в целом. Обозначения приведены на рисунке.



Главная же особенность неоднородности пластического течения локализованного поля состоит в том, что в силу влияния общей кинематики деформирования отдельные направления активизируются за счет других. Так, в поле рис.1,а на линиях скольжения, например в точках M_1 и M_2 на пересечениях с элементарным объемом Δx возникает круг Мора для напряжений 1 и распределение сдвигающего напряжения τ_θ (кривая 2) максимальные значения которых вдоль линии скольжения 2 $\tau_{max}=k$ (рис.1,д). Сдвиг вдоль линий скольжения оказывается разрешенным, а поперек (по направлению) – запрещенным. Деформация сдвига в тех же точках M_1 и M_2 $\varepsilon=\Gamma=\Gamma_1$ и $\varepsilon=\Gamma=\Gamma_2$, т.е. в каждой из точек главная деформация $\varepsilon_1=\Gamma$. Только в точке O на пересечении линий скольжения 1 и 2 круг Мора срабатывает в полной мере, оба направления в точке становятся равноценными и деформация в этой точке удваивается $\varepsilon=\Gamma_1+\Gamma_2=2\Gamma$. В любой другой точке системы, не лежащей на 1 и 2, те же

Рис. 1. Неоднородность напряженно-деформированного состояния идеально пластичного тела на примере сжатия квадрата (плоская задача)

параметры круга Мора для напряжений не вызывают остаточной деформации ($\Gamma=\varepsilon=0$). Таким образом, уже на основании этого элементарного представления можно сделать вполне опре-

деленный вывод о том, что локализованная картина деформированного состояния только на пересечении линий скольжения (точка O) соответствует кругам Мора для напряжений и деформаций.

Такой же уровень деформированного состояния возникает в точках M_1 и M_2 элементарного объема Δx , если сложить их деформацию воедино. На каждой линии скольжения ковочного креста деформационный процесс сковывается наполовину и только одновременная деформация на двух пересечениях доводит ее до заданного уровня. Уже на этом основании можно сделать заключение о том, что даже элементарное, однородное по напряжениям поле ЛС самоорганизует свою структуру неоднородности и развитие деформационного процесса в его пределах. Довольно обоснованным может выглядеть вывод о том, что это явление носит общий характер и должно учитываться во всех случаях анализа. В частности, при $k_1=k_2$ общая деформация сдвига в элементе Δx равна $\Gamma=\Gamma_1+\Gamma_2=2\Gamma=2\varepsilon_1$. В развитых процессах обычно почти по всему полю (кроме линий симметрии) имеет место условие $\Gamma_1\neq\Gamma_2$. Для приращения деформаций сохраняется условие $\Gamma=\Gamma_1+\Gamma_2$ при $k_1=k_2$.

Указанная особенность самоорганизации общей кинематики течения сама по себе является дополнительным механизмом упрочнения – разупрочнения, который несет локальный или общий характер своего проявления. Особенно ярко упомянутая тенденция должна проявляться в исследованиях и анализе процессов, когда баланс сдвигающих напряжений вдоль ЛС, пересекающихся в точке, приводит по совокупности деформационных проявлений к ситуации, когда возникает условное неравенство максимальных сдвигающих напряжений ($k_1\neq k_2$).

Из известных технологий такая ситуация складывается в процессе резания со снятием стружки. На рис.2,а показано сжатие того же квадратного образца и отдельно представлена схема квадранта, образующего фрагмент реперного процесса резания (резец 3). Отрезок линии скольжения 2 совпадает с плоскостью резания. На рис.2,б показана более детализированная схема реперного резания. Передний угол $\gamma=0$, контактное трение $\tau_k=0$, релаксационная добавка параметра плоскости резания $\delta=0$. Кривые 3 и 4 показывают границы очага деформации сдвига материала, упрочняющегося до площадки текучести (для материала, деформирующегося остаточной в диапазоне напряжений). На рис.2,в представлен годограф скоростей для $k=const$. Деформация сдвига вдоль плоскости резания 2 равна $\Gamma_1=v_\tau/v_n=2$. Многим исследователям казалось, что это построение исчерпывает анализ напряженного ($\sigma_s=2k$) и деформированного ($\Gamma_1=\Gamma=2$) состояния. При этом эти параметры полностью соответствуют напряженно-деформированному состоянию, проявляющемуся при сжатии квадрата (рис.1,а). Разница состоит в том, что при осадке вдоль элементарного объема суммарная деформация и перемещения развиваются в двух сечениях симметрично. В случае же резания такая возможность отсутствует, симметрия сдвига по линиям скольжения пропадает. На рис.2,г показан фрагмент главной линии скольжения (волнистая линия) и параллельные линии сдвига 2' и 2'', символизирующие собой переход от одной линии скольжения к полосе скольжения. Здесь же нанесены линии тока 5 и 6, пересекающие очаг деформации и образующие трубку тока. Ее особенностью является то, что сечение трубки тока оказывается переменным (изменяется в $\sqrt{2}$ раз в одну и другую стороны). Последнее вызывает сжатие – растяжение материала, проходящего через трубку тока, сопровождающееся поворотом направления главного нормального напряжения на угол $\pi/2$, что соответствует локальному (в пределах трубки) повороту линий скольжения на тот же угол. Такое радикальное изменение схемы напряженного состояния (порождение одного поля другим) увеличивает напряжение резания от предела текучести $\sigma_1=\sigma_{s1}$ до твердости $\sigma_{s2}=(2+\pi)\sigma_s/2$. Избыток напряжения в направлении плоскости реза-

ния вызывает сжатие полосы, которая выдавливается (экструдирована) в направлении свободной поверхности. Процесс возникновения этой комбинированной схемы деформирования меняется периодически (смена направлений главных напряжений), поддерживая автоколебания, формирует на тыльной стороне сливной стружки густорасположенные заостренные зубрины (это факт, известный каждому токарю).

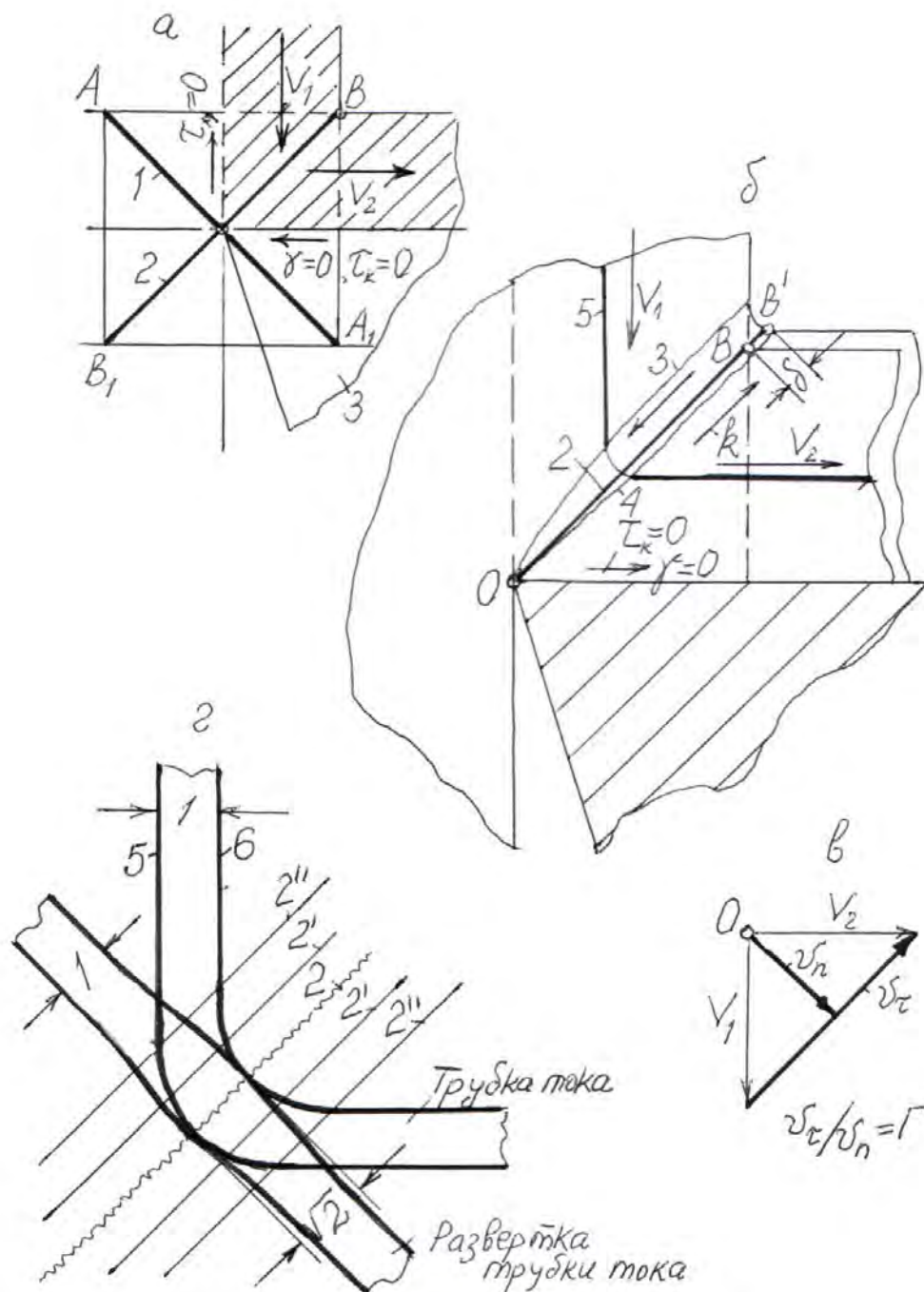


Рис.2. Возникновение кинематического упрочнения при отсутствии симметрии движения по пересекающимся линиям скольжения в процессе резания

Уже первые результаты по исследованию процесса резания со снятием стружки, полученные при применении динамометрирования [11], указывали на то обстоятельство, что сопротивление резанию при обработке металлов определяется твердостью. Даже дискутировался вопрос, какая твердость, по Бринеллю или по Мейеру, больше подходит для характеристики процесса.

Таким образом, построение расчетной системы механики деформационных процессов с учетом парадигмы и принципа самоорганизации оказалось более информативной, чем действующие системы, что доказывает даже краткое изложение некоторых уже полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макушок Е.М. Самоорганизация деформационных процессов. Мн.,1991.
2. Макушок Е.М. Парадигма механики, учитывающая самоорганизацию неоднородных деформационных процессов. Весці АНБ, сер.ФТН, 1994, №2.
3. Макушок Е.М. Механика трения. Мн.,1974.
4. Инженерная теория пластичности //Макушок Е.М., Белый А.В., Дмитриевич Д.И., Калиновская Т.В. и др. Мн.,1985.
5. Макушок Е.М., Макушок Ю.Е. Новый подход к развитию теории деформационных процессов. Материалы международной конференции по ПКП. Сб.научных трудов. Мн., 2002.
6. Губкин С.И. Теория обработки металлов давлением. М., 1947.
7. Макушок Е.М., Макушок Ю.Е. Единое условие пластичности. /Теория и технология процессов пластической деформации. М., МИСИС, с.559-565.
8. Макушок Е.М., Садко В.И. и др. Специфика трения скольжения и качения при поперечной прокатке. Там же, с.321-326.
9. Теоретические основы процессов поверхностного пластического деформирования /Макушок Е.М., Калиновская Т.В., Красневский С.М. и др. Мн., 1988.
10. Ишлинский А.Ю. О некоторых проблемах механики. /Наука и человечество. М., 1968.
11. Кузнецов В.Д. Наросты при резании и трении. М.,1956.