

УДК 621.4/9.536.75; 531; 621.73.011/539.374

РОЛЬ СТРУКТУРЫ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ФОРМИРОВАНИИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ДЕФОРМАЦИОННОГО ДВИЖЕНИЯ

Доктора техн. наук, профессора МАКУШОК Е. М., ПЕТЮШИК Е. Е., РЕУТ О. П.

Белорусский национальный технический университет

Цель исследования состоит в развитии теоретических основ технологической информационной системы анализа деформационного движения до уровня обобщения, обеспечивающего разрешающую способность, удовлетворяющую запросы практики и не требующую попутного экспериментального обоснования. В числе прочего, по мнению авторов, развитие расчетной системы пластического течения должно включать влияние механизмов турбулентности, возникающих при деформационном движении твердого тела в условиях комбинированного напряженно-деформированного состояния, и особенностей, возникающих вследствие изменения ориентации нагрузки относительно кристаллографических плоскостей в элементарном объеме, в пределах зерна или всего очага деформации.

Суть подхода к совершенствованию теоретических представлений опирается на общие положения синергетики (самоорганизации процессов и явлений) [1] и их приложения в области обработки материалов давлением [2, 3]. Чтобы воспринять специфику самоорганизации деформационного движения, полезно вспомнить, что движение вообще является важнейшим атрибутом, способом существования материи [4]. Хорошо известно, что формы движения иерархичны и несут признаки классифицируемости в нескольких направлениях, которые могут учитывать: во-первых, специфику деформируемых объектов (и прежде всего структуру строения и сопротивление движению); во-вторых, проявление общих реологиче-

ских законов для данной формы движения, в-третьих, закономерности исторического развития материи и движения от простейших до наиболее сложных форм и обратно, учитывающих функционирование механизмов в зависимости от условий движения на макро-, микро-, мезо-, нано-, молекулярном, атомном и электронном уровнях. Это многообразие уровней проявления механизмов и характер их взаимодействия позволяют выделить некоторые закономерности синергетического движения и использовать их в решении, объединяя совместное действие механизмов движения на разных уровнях строения и взаимодействия отдельных частиц, локальных микроструктур и конечных областей деформируемого тела.

Определенные нюансы формирования и поведения структур напряженно-деформированного состояния проявляются в комбинированных очагах деформации и различаются симметричным (для симметричной структуры напряженно-деформированного состояния) и асимметричным (для асимметричной структуры напряженно-деформированного состояния) признаками развития массопереноса на переходе от ламинарного сдвига к появлению турбулентных признаков течения. Здесь нужно отметить, что понятие «турбулентность» (лат.) означает «беспорядочность», и только в отдельных случаях движение является вихревым.

Методика отыскания обобщенных параметров уже прижилась в квантовой механике и астрофизике прежде всего в тех случаях, когда оказывается, что нарушение симметрии неко-

торой структуры (в нашем случае структуры напряженно-деформированного состояния) позволяет установить взаимовлияние взаимодействующих параметров [5].

Оказалось, что в случае «свободного» (симметричного), не связанного с другими влияющими параметрами, формирования структуры напряженно-деформированного состояния, мы встречаемся, при прочих равных условиях, с минимальным сопротивлением деформированию, которое обусловлено формированием единого ортогонального поля линий скольжения (как в плоских, так и в объемных задачах), распространяющего ламинарный принцип движения на весь очаг деформации. В случаях «несвободного» (асимметричного) формирования структуры напряженно-деформированного состояния возникают комбинированные процессы пластического течения, которые развиваются по двум, нескольким или множественным полям линий скольжения. Последние накладываются друг на друга и приводят в ряде случаев к радикальным изменениям энергосиловых параметров изучаемых процессов.

На этом фоне происходят события, которые требуют уточнения некоторых сложившихся принципов механики, возникших до появления методологии синергетики. Это, прежде всего, принцип Гаусса, утверждающий роль наименьшего принуждения, согласно которому для механической системы с идеальными связями из всех кинематически допустимых движений, начинающихся из данного положения и с данными начальными скоростями, истинным будет то движение, для которого «принуждение» является в каждый момент времени наименьшим [6]. Причем для общего случая понятие «принуждение» вводится в анализ от точки при действии на нее некоторой силы, придающей ей соответствующее ускорение, которое уменьшается действием связей. Для механической системы принуждение равняется сумме всех действующих механизмов связи.

С подобной же деталью мы встретимся в анализе принципа динамики Д'Аламбера, согласно которому к реакциям статических связей присоединяются силы инерции. Та же картина заложена и в принципе Д'Аламбера – Лагранжа, дающего общий метод решения задач динамики и статики и объединяющего прин-

цип возможных перемещений и принцип Д'Аламбера.

Введение особенностей, вызываемых возникающими элементами турбулентности, фактически добавляет к исходным связям, характеризующим спецификой «свободно» деформируемых объектов, дополнительные связи, возникающие от приспособления структуры напряженно-деформированного состояния к структуре строения материала и ориентации этих структур относительно направления нагрузки. Здесь речь уже начинает идти об элементарных актах самоорганизации пластического движения, вызванных общим развитием деформационного процесса до уровня взаимодействия структуры строения и структуры напряженно-деформированного состояния.

Возникновение симметрии в формировании структуры напряженно-деформированного состояния показано на рис. 1а, где приведено построение схемы симметричного плоского сжатия квадрата по теории идеальной пластичности. В этом случае мы имеем чисто «свободное» формирование структуры напряженно-деформированного состояния с минимальным сопротивлением деформированию ($\tau_{\max} = \text{const}$), которое обусловлено возникновением «свободного» ортогонального поля линий скольжения, отвечающего ламинарному характеру деформирования по двум главным линиям скольжения AA_1 и BB_1 , образующим «ковочный крест». Признак «симметрии» структуры возникает вследствие доминирующего влияния общей кинематики деформируемого тела, которая обеспечивает симметричный ламинарный сдвиг по направлениям AA_1 и BB_1 . Это состояние, возникающее прежде всего от ламинарного характера сдвига вдоль главных линий скольжения и формоизменения деформируемого тела за счет относительного смещения жестких блоков AOB , AOB_1 , B_1OA_1 и A_1OB , напряженно-деформированное состояние границ которых представлено кругами Мора, отображающими в общем виде функциональные связи $\tau = f_1(\sigma)$ и $\Gamma = f_2(\varepsilon)$, графически представлено на рис. 1в. Здесь Γ и ε – деформации сдвига и сжатия соответственно, σ и τ – напряжения сжатия и сдвига. Для элементарного объема $dv = hdx$ (рис. 1а) под влиянием общей кинематики в распределениях сдвигающих напряжений по

направлениям (кривая 2) выделено направление AA_1 , по которому происходит активный сдвиг Γ_1 , представленный сплошным кругом деформаций 3 при $\tau_k \rightarrow 0$. Направление BB_1 в

этой ситуации в сечении элементарного объема A^* оказывается заблокированным общей кинематикой тела, что отмечено штриховкой распределения τ .

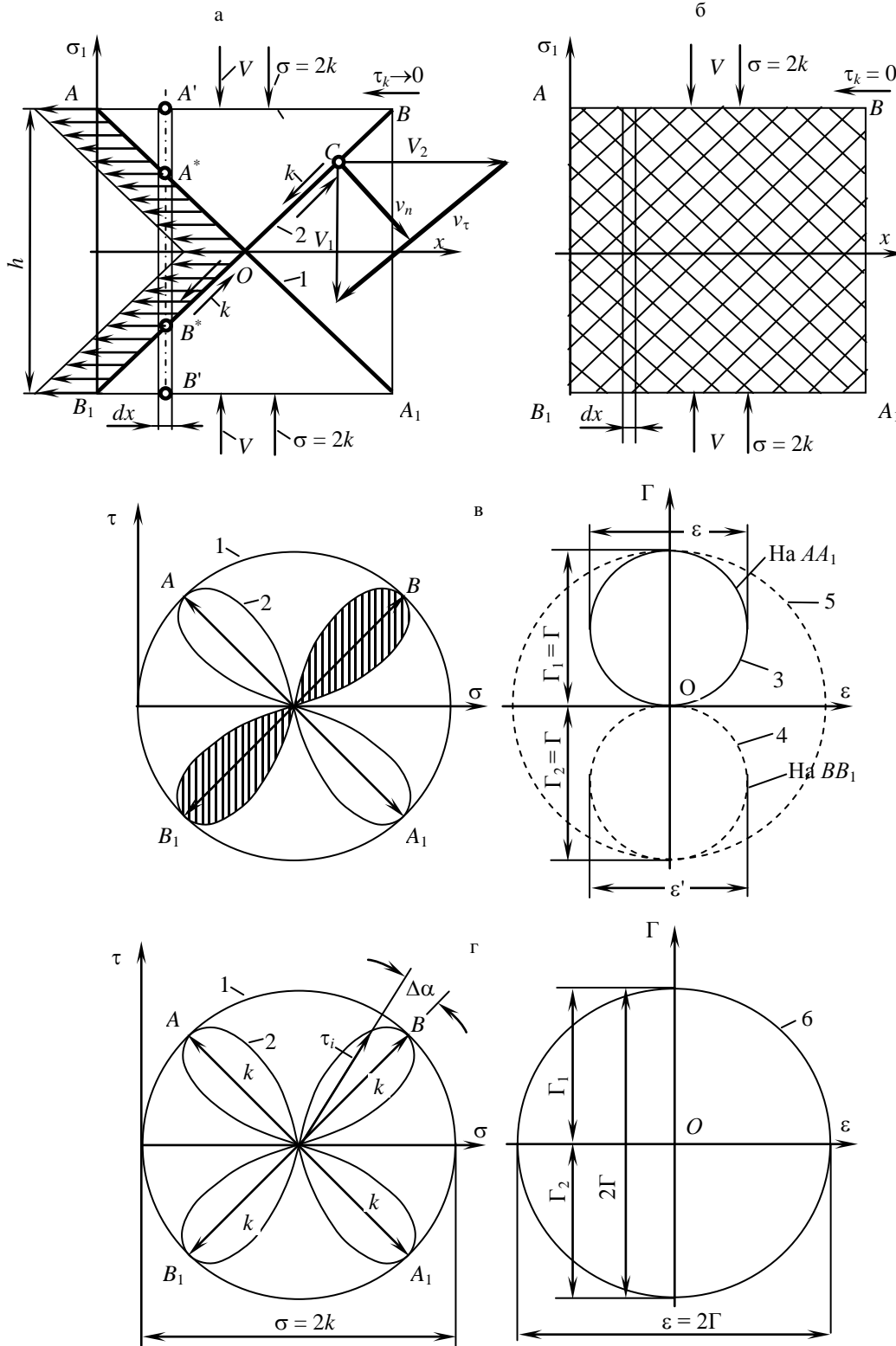


Рис. 1. Модель развития деформаций сдвига при элементарной «свободной» осадке

Движение сдвига элементарного объема по направлению BB_1 происходит только в его сечении B^* , в котором максимальное сдвигающее напряжение активизируется под влиянием общей кинематики. Деформированное состояние в B^* показано кругом деформаций 4. Суммирование состояний в A^* и B^* демонстрируется кругом деформаций 5. На рис. 1г показано состояние, возникающее на пересечении главных линий скольжения (точка O). Оба направления сдвига AA_1 и BB_1 являются активными и в сумме дают круг деформаций, произошедших в двух сечениях каждого элемента dx , и в том числе центрального элементарного объема.

Таким образом, приведенная задача со всей очевидностью демонстрирует роль структуры напряженно-деформированного состояния даже в простейшей ситуации. Специфика условий этой задачи и характер ее решения позволяют надеяться, что ее проникновение на более глубокие уровни взаимодействия позволит установить некоторые не описанные теорией закономерности, тем более что возникновение структуры напряженно-деформированного состояния характерно как для изотропной, так и для анизотропной континуальных сред, положенных в начало всех поисков в исследованиях деформационного движения, а также для структурированной, обладающей атомно-молекулярной структурой, усложненной зерненным строением, многофазностью и дефектами структуры.

В основу общей системы анализа следует положить закон сдвигающего напряжения, сформулированный С. И. Губкиным в 1947 г.: «Процесс пластической деформации происходит в кристаллическом теле только в том случае, если в нем действует сдвигающее напряжение определенной величины, зависящей от природы тела и условий деформирования» [7, с. 207]. Подчеркнем, что эта формулировка фактически представляет собой качественный закон самоорганизации деформационного движения. Его структура фиксирует обобщенные многопараметрические стороны явления. Прежде всего это влияние собственных (исходных) свойств деформируемого тела и влияние условий деформирования, которые самоорганизуют проявление структурных особенностей деформируемого тела и его напряженно-деформированного состояния.

Поскольку обобщенным проявлением свойств в процессах деформационного движения является сопротивление деформированию (по терминологии теоретической механики – «принуждение»), то вклад влияния условий деформирования целесообразно представить в виде приращений, в форме, отнесенной к сдвигающему напряжению. В этом случае формулировка С. И. Губкина может быть записана в виде

$$\tau = \tau_{ис} + \Delta\tau_{уд}, \quad (1)$$

где τ – значение максимального сдвигающего напряжения; $\tau_{ис}$ – значение сдвигающего напряжения при исходном состоянии; $\Delta\tau_{уд}$ – приращение сдвигающего напряжения от изменения условий деформирования.

Параметр $\Delta\tau_{уд}$, как и $\tau_{ис}$, – обобщенное многопараметрическое свойство. Более того, поправка от условий деформирования должна включать не только изменение величины τ от влияния изменяющихся внутренних условий (в частности общего деформационного и температурного упрочнения – разупрочнения), но и содержать влияние внешних факторов, в частности инструмента (форма переходов, шероховатость поверхности, контактное деформационное и температурное упрочнение – разупрочнение за счет контактной теплопередачи и т. п.), влияние со стороны нагружающего устройства (давление рабочей среды, ее объем, упругость инструмента, жесткость оборудования и т. п.) и, наконец, влияние окружающей среды (окисление поверхности, перегрев, перегон и т. п.).

Показанная особенность самоорганизации общей кинематики течения при симметричной структуре напряженно-деформированного состояния обеспечивает растекание материала в обе стороны относительно плоскости симметрии и реализует мгновенное неоднородное деформированное состояние: в виде $\varepsilon = 0$ в любой точке сечения ABA_1B_1 , кроме пересекающихся главных линий скольжения AA_1 и BB_1 , в виде $\varepsilon = \Gamma = 2$ на этих линиях и в виде $\varepsilon = 2\Gamma = 4$ на их пересечении (точка O). В соответствии с формулировкой задачи на контакте имеет место сколь угодно низкий уровень контактного трения ($\tau_k \rightarrow 0$).

На рис. 1б показано поле линий скольжения при $\tau_k = 0$. Из локализованного оно преобразо-

валось в однородное поле сжатия, в котором каждый элемент деформируется пластически так же, как тело в целом. На малом перемещении $\varepsilon = dh/h$ сопоставимые условия $\tau_k \rightarrow 0$ и $\tau_k = 0$ выбраны для демонстрации сильного влияния внешнего трения о поверхность инструмента на кинематику процесса и, в частности, на его неоднородность. Здесь – от предельной концентрации по регламентированным траекториям (AA_1 и BB_1) до однородности по всему объему. При переходе от одной схемы к другой изменяется характер контактного массопереноса от «прилипания», сопровождающего перенос сдвига на границу очага деформации (в рассматриваемом случае на главные линии скольжения) до упругопластического течения по контакту. Переход параметров одного поля к параметрам другого согласно рис. 1а, б (индексы параметров а и б соответственно) описывается условиями:

$$\tau_a = \sigma_a/2 = k; \quad \varepsilon_a = 2\Gamma = 2; \quad \tau_b = \sigma_b/2 = k; \quad (2)$$

$$\varepsilon_b = dh/h \rightarrow 0; \quad \tau_a/\tau_b = \eta_\tau = 1; \quad \varepsilon_a/\varepsilon_b = \eta_\varepsilon; \quad \varepsilon_a \gg \varepsilon_b,$$

где η_τ – относительная величина сдвигающего напряжения; η_ε – относительная деформация, определяющая тенденцию к изменению сопротивления деформированию.

Таким образом, уже в задаче о формировании элементарного поля линий скольжения с учетом следов трения может возникать ситуация искусственной неоднозначности. При этом следует иметь в виду, что условие $\tau_k = 0$ не имеет физического обоснования и трудно достижимо в эксперименте, да и то за счет введения в контакт третьего тела. Впрочем, это обстоятельство должно настораживать каждого исследователя, овладевающего методом самоорганизации. Этот метод не допускает введения необоснованных (не физических) допущений, требуя повышения культуры научных исследований на всех уровнях физического строения тела.

В простейшем виде самоорганизующийся путь изменения сопротивления деформированию от исходного состояния деформируемого тела должен включать параметр исходного состояния:

$$\tau \rightarrow \tau_{ис}; \quad \tau \rightarrow \tau_0 = \tau_{ис}; \quad \tau_0 = k = \tau_{ис}. \quad (3)$$

Здесь τ – сдвигающее напряжение; τ_0 – его начальное значение (предел упругости или предел пропорциональности), пренебрегающее упругой составляющей; $\tau_{ис}$ – исходное значение в расчетной системе; k – сопротивление сдвигу в теории идеальной пластичности.

Стрелка между параметрами обозначает выбор из некоторого массива данных.

В принципе при решении задач обычно за исходное состояние берут параметр девственного состояния, значение сопротивления деформированию в интересующей точке кривой упрочнения, из справочной литературы (базы экспериментальных данных) либо по результатам специального эксперимента. Здесь остановимся на утверждении, что исходное свойство отвечает формулировке закона (1), но изложение этого фрагмента производим в соответствии с представлением сдвигающего напряжения в форме $\tau_0 = \tau_{ис} = k$, т. е. на модели идеального пластичного (жесткопластичного) тела.

Вклад влияния внутренних и внешних условий деформирования целесообразно представить в форме реологических зависимостей приращения сопротивления деформированию, выражающих собой критерии самоорганизации. Эта структура позволяет обобщенно представить текущее сопротивление движению в форме реологических закономерностей, учитывающих влияние различных факторов, в том числе разнонаправленных, на сопротивление деформированию через сопротивление сдвигу:

$$\tau \rightarrow \tau_{ис} + \Delta\tau_{уд}, \quad (4)$$

где $\Delta\tau_{уд} = \tau_{тз}$ – обобщенное приращение от влияния условий деформирования ($\tau_{тз}$ – достигнутое сопротивление сдвигу).

Дальнейшая детализация влияния совокупностей внутренних и внешних параметров изменения исходного сопротивления деформированию позволяет представить качественный закон (4) в развернутом виде

$$\tau \rightarrow \tau_{ис} + \Delta\tau_{уд} = \tau_{ис} + \Delta\tau_{уд0} + \Delta\tau_{уд1} + \Delta\tau_{уд2} + \Delta\tau_{уд3}, \quad (5)$$

где $\Delta\tau_{уд0}$ – параметр, представляющий изменение внутреннего сопротивления деформированию, в том числе по причине возникновения элементов перехода от ламинарного сдвига к

турбулентному; $\Delta\tau_{уд1}$ – приращение от специфики инструмента (форма переходов, шероховатость поверхности, деформационное и температурное упрочнение – разупрочнение и т. п.); $\Delta\tau_{уд2}$ – влияние специфики нагружающего устройства (давление рабочей среды, ее объем, упругость инструмента, жесткость оборудования и т. п.); $\Delta\tau_{уд3}$ – влияние окружающей среды (окисление поверхности, перегрев, пережог и т. п.).

В (5) параметры приращения сдвигающего напряжения являют собой критерии самоорганизации, представляемые на соответствующем уровне обобщения.

Каковы же нарушения структуры напряженно-деформированного состояния и каким образом в комбинированном процессе они реализуют свое специфическое влияние на напряженно-деформированное состояние в целом?

Рассмотрим комбинации, вызываемые появлением дополнительных механизмов движения, вызывающих рост сопротивления деформированию. Прежде всего это становится неизбежным, когда сдвиг по одному из направлений ортогонального поля оказывается запрещенным общей кинематикой деформируемого тела. С такой системой, не усложненной влиянием вторичных механизмов, мы встречаемся в полной мере в процессе резания со снятием стружки. Здесь мы сталкиваемся с кинематическим упрочнением, фактически вызывающим отклонение направления сдвига от его направления при симметричном развитии процесса. Действительно, стружка в этом процессе сдвигается вдоль передней грани в одну сторону.

На рис. 2а приведена схема процесса резания, которая возникает в одном квадранте сжимаемого образца, опирающегося на резец 3, или включает в очаг деформации весь объем квадрата (резец 3'). В этом случае линия скольжения BB_1 является следом плоскости активного сдвига. Направление AA_1 , обладая тем же уровнем напряженного состояния, за счет общей кинематики резания выпадает из чисто сдвиговой деформации. Рассматривается задача с реперными параметрами – передний угол $\gamma = 0^\circ$, контактное трение по передней грани $\tau_k = 0$.

На рис. 1а представлен годограф скоростей от точки C . Деформация сдвига вдоль плоскости активного сдвига равна $\Gamma_1 = v_\tau/v_n = 2$. Мно-

гим казалось, что это построение исчерпывает аналитические возможности напряженного ($\sigma_s = 2k$) и деформированного ($\Gamma = 2$) состояний в полосе скольжения. При этом приведенные выше параметры полностью соответствуют напряженно-деформированному состоянию, проявляющемуся при симметричном сжатии квадрата. Разница состоит в том, что при осадке вдоль элементарного объема $dv = hdx$ в соответствии с симметрией структуры напряженно-деформированного состояния суммарная деформация и перемещения развиваются в двух сечениях симметрично (окрестности точки A^* и B^*). В случае же резания (рис. 2а) такая возможность отсутствует. Направление AA_1 по условиям деформирования радикально отличается от направления BB_1 , поскольку здесь происходит преломление или изгиб трубки тока, возникает вынужденная перегрузка и соответствующее изменение структуры напряженно-деформированного состояния. На рис. 2б показана эта ситуация. Для ощущения деформационного события линия скольжения 2^* представлена пачкой параллельных линий скольжения $2^*-2'-2''$, которые пересекают трубку тока под разными углами. Относительно оси трубки тока отдельные линии пачки скольжения поворачиваются на угол $0 \leq \varphi_{\text{тт}} \leq \pi/2$ ($\varphi_{\text{тт}}$ – угол поворота рассматриваемой трубки тока, $(\varphi_{\text{тт}})_{\text{max}} = \pi/2$), что позволяет представить деформационный процесс в трубке тока в виде пластического сжатия с последующим растяжением. В соответствии с законом равновесия в поле линий скольжения локальное приращение гидростатического давления пропорционально удвоенному углу поворота линий скольжения, откуда и возникает величина упомянутой выше перегрузки, определяющая кинематическое упрочнение в условиях рассматриваемой реперной задачи.

Прохождение материала через трубку тока сопровождается в обсуждаемом случае ее изгибом на угол $\varphi_{\text{тт}} = \pi/2$, что соответствует повороту линий скольжения на тот же угол, отвечающий сопротивлению вдавливания плоского пуансона в пластическое полупространство, которое по определению представляет собой твердость пластичного материала. Такое радикальное изменение схемы напряженно-деформированного состояния, вследствие порожд-

дения одного поля другим, увеличивает сопротивление деформированию реперного процесса от предела текучести $(\sigma_s)' = 2k$ до $(\sigma_s)'' = (2 + \pi)k$. Этот результат, соответствующий схеме закона (3), позволяет записать зависимость кинематического упрочнения в форме приращения сдвигающего напряжения при перемене направлений главных нормальных и сдвигающих напряжений, выраженных через угол поворота трубки тока $\varphi_{\text{тт}}$ или через угол

рассогласования направлений сдвига $\varphi_{\text{уд}}$, показанного на рис. 2в:

$$\begin{aligned} \tau &\rightarrow \tau_{\text{ис}} + \Delta\tau_{\text{уд}}; & \tau_{\text{ис}} &= k; & \Delta\tau_{\text{уд}} &= \pi k/2; \\ \Delta\tau_{\text{тт}} &= \Delta\tau_{\text{уд}} = \pi k/2; & & & & \\ \Delta\tau_{\text{т3}} &= k + \Delta\tau_{\text{уд}} = k(1 + \varphi_{\text{тт}}) = k(1 + \varphi_{\text{уд}}). \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь $\varphi_{\text{тт}}$ – угол поворота трубки тока (рад.); $\varphi_{\text{уд}}$ – угол рассогласования направлений сдвига (рад.); $\tau_{\text{т3}}$ – достигнутое значение сдвигающего напряжения.

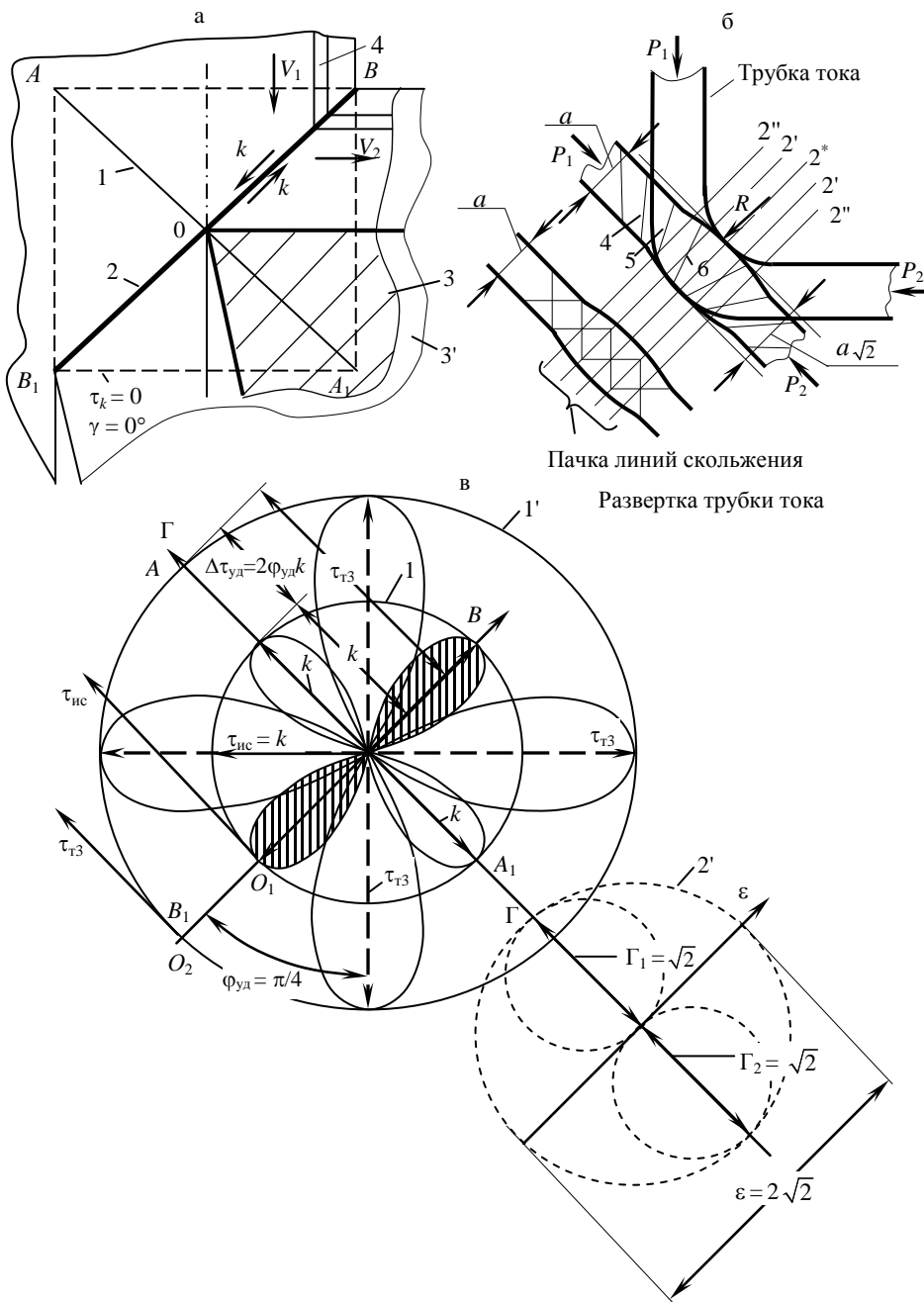


Рис. 2. Модель развития деформационного сдвига при асимметричной осадке

На рис. 2в показана детализация напряженно-деформированного состояния при пересечении направления BB_1 с построением кругов Мора для напряжений (кривая 1) и деформаций (кривая 2). Особенность построения состоит в том, что в направлении BB_1 происходит активный сдвиг в плоскости резания, направление $\tau_{\max} = k$ совпадает с аналогичным направлением при свободном сжатии. Как было отмечено, в направлении AA_1 за счет изменения схемы напряженно-деформированного состояния сдвиг оказывается запрещенным. Это новое условие вызывает определенное изменение напряженного состояния. Последнее выражается в том, что сдвиг вдоль AA_1 преобразуется в сжатие – растяжение, реализуемое в трубке тока, образовавшейся вдоль искривленного участка при повороте на угол $\pi/4$. Этот поворот главных напряжений σ_1 и σ_2 приводит к тому, что гидростатическое давление возрастает от $\tau_{\max} = k$ (исходное состояние свободного деформирования) до $\tau_{\max} = k + \Delta\tau_{уд0} = k + 2k\varphi_{уд}/\pi$ (состояние поворота главных напряжений на угол $\varphi_{уд} = \pi/4$), что соответствует переходу от круга гидростатического давления 1 к его аналогу в новых условиях схемы напряженно-деформированного состояния (к кругу 1'). Изменение деформированного состояния в условиях рассматриваемой реперной задачи переходит от параметров сдвига к исходному параметру сжатия – растяжения.

Интересно было бы поставить серию экспериментов по исследованию закономерности (6) и следствий, которые ей сопутствуют. Но это в существенной части выполнено ранее. Первые достоверные результаты по исследованию процессов резания металлов и древесины были получены еще в начале прошлого века, когда было применено динамометрирование и металлографические исследования. Прекрасный обзор работ в этой области выполнил В. Д. Кузнецов [8]. Студенты соответствующих специальностей выполняют лабораторные работы, которые не опровергают полученные ранее результаты. В упомянутом источнике даже приводятся некоторые сведения о дискуссии на тему, какая твердость, по Бринеллю или по Мейеру, больше подходит для характеристики процесса. Конечно, такая деталь показывает, что действительно в процессе резания нарушается симметрия напряженно-деформированного состояния,

что переводит сопротивление деформированию на уровень твердости при угле резания $\gamma = 0^\circ$. Однако отмеченная особенность комбинирования напряженного состояния получает теоретическое обоснование только теперь за счет выделения признака турбулентности на стадии потери условий ламинарности, что позволяет углубить исследования деформационных процессов на самых высоких уровнях строения материалов.

В представленном материале приведен анализ одного класса турбулентного характера деформационного движения. Конечно, продолжение работы должно выявить и оценить другие механизмы турбулентности, а также случаи возникновения аномальных деформационных явлений, с одним из которых авторы статьи встретились при работе с технологией изостатического (радиального) прессования намотанных проволочных конструкций. Первая информация, посвященная наблюдению аномального деформационного явления, опубликована в [9]. В [10, 11] дана общая характеристика этого явления. Подчеркнем, что это деформационное событие возникает вследствие проявления неоднородности и асимметрии структуры напряженно-деформированного состояния, которая является результатом перехода от нагрузки к разгрузке. В данном случае в процессе разгрузки реверсирование напряженного состояния происходит с участием запаса упругой энергии, накопленной не только в обрабатываемом теле, инструменте, устройстве, но и в рабочей среде (жидкость в гидросистеме, эластичные элементы технологического оборудования и инструмента). Одним словом, зависимость изменения условий деформирования вызывает новые качества очага деформации, порождающие появление усов по контуру фактического контакта, несущих следы обжатия на два-три порядка больше размеров исходных проволок $\varnothing 0,15$ мм.

Принимая во внимание, что по пересекающимся трубкам тока, передающим напряженно-деформированное состояние, действуют разные схемы напряженно-деформированного состояния, можно утверждать, что происходит дополнительный поворот напряженно-деформированного состояния относительно деформирующегося материала. Это, конечно, оказывает существенное влияние не только на возникно-

вание локальной особенности напряженного состояния, но и повышение прочности. Раскрываются также дополнительные возможности исследования локального исчерпания ресурса пластичности, возникновение начальных элементов разрушения, приводящих к развитию деструкции материала, вплоть до разрушения.

ВЫВОД

Представление сопротивления сдвигу в системе самоорганизации деформационного движения не может быть завершено без теоретического вскрытия и этих сопутствующих закономерностей механики, оказывающих существенное влияние на сопротивление деформированию и долговечность изделий. Изучение влияния факторов разрушения как элементов общего сопротивления деформированию позволит представить теории прочности, пластичности, разрушения и других смежных с ними дисциплин на более высоком уровне по сравнению с нынешним. Именно введение в теорию понятия структуры напряженно-деформированного состояния как фактора, уточняющего сопротивление деформационному движению в форме симметричного и асимметричного ее представления, позволяет существенно повысить разрешающую способность теории деформационного движения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Хакен, Г.** Синергетика / Г. Хакен. – М.: Мир, 1980. – 406 с.
2. **Макушок, Е. М.** Самоорганизация деформационных процессов / Е. М. Макушок. – Минск: Наука і тэхніка, 1991. – 264 с.
3. **Макушок, Е. М.** Парадигма механики, учитывающая самоорганизацию неоднородных деформационных процессов / Е. М. Макушок // Весці Акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1994. – № 2. – С. 44–47.
4. **Философский** энциклопедический словарь / ред.-сост. Е. Ф. Губский [и др.]. – М.: Инфра-М., 2003. – 576 с.
5. **Сахаров, А. Д.** Воспоминания / А. Д. Сахаров // Наука и жизнь. – 1991. – № 4. – С. 10–19.
6. **Физическая** энциклопедия / гл. ред. А. М. Прохоров, редкол. Д. М. Алексеев [и др.]. – М.: Большая Российская энциклопедия. – 1998. – Т. 1. – 704 с.
7. **Губкин, С. И.** Теория обработки металлов давлением / С. И. Губкин. – М.: Metallurgizdat, 1947. – 532 с.
8. **Кузнецов, В. Д.** Наросты при резании и трении / В. Д. Кузнецов. – М.: Машгиз, 1956. – 184 с.
9. **Петюшик, Е. Е.** Особенности деформирования проволоки при радиальном обжатии тел намотки / Е. Е. Петюшик // Проблемы инженерно-педагогического образования в Республике Беларусь: материалы междунар. науч.-практ. конф. / под общ. ред. Б. М. Хрусталева. – Минск: УП «Технопринт», 2004. – С. 281–286.
10. **Макушок, Е. М.** О возникновении деформационной аномалии при радиальном обжатии намотанных проволочных конструкций / Е. М. Макушок, Е. Е. Петюшик, О. П. Реут // Машиностроение. – 2007. – Вып. 23. – С. 367–370.
11. **Макушок, Е. М.** О методологии анализа деформационных аномалий при радиальном обжатии проволочных конструкций / Е. М. Макушок, Е. Е. Петюшик, О. П. Реут // Порошковая металлургия. – 2007. – Вып. 30. – С. 280–286.

Поступила 22.02.2008

УДК 621.785.048.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОУПРОЧНЕНИЯ ВНУТРЕННИХ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТОРМОЗНЫХ МЕХАНИЗМОВ ТРАКТОРА «БЕЛАРУС»

*Канд. техн. наук КОБЯКОВ О. С., докт. техн. наук, проф. СПИРИДОНОВ Н. В.,
канд. техн. наук КАРДАПОЛОВА М. А., БАРКУН А. А.*

*Белорусский национальный технический университет,
Минский тракторный завод*

Тормозная многодисковая система трактора модели 1221М, работающая в смазочной масляной среде, отличается повышенной надежностью, долговечностью и отвечает ряду современных требований и международным стандартам качества.

Однако с точки зрения равноресурсности, ряд деталей тормозных механизмов нуждаются в повышении их ресурса по прочностным и износостойким свойствам. К числу таких деталей относятся корпусные детали тормоза, изготовленные из высокопрочного чугуна марки ВЧ-50.