

ОТЗЫВ
официального оппонента на диссертационную работу
Буханько Анастасии Андреевны
на тему «Теория пластического течения в механике разрушения и её
приложения», представленную на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук по специальности
01.02.04 – механика деформируемого твёрдого тела

1. Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников из 210 наименований и одного приложения; содержит 205 страниц основного текста, включая 50 рисунков и 1 таблицу. По объёму и структуре работа соответствует требованиям «Положения» к оформлению диссертаций. Изложение диссертационной работы подчинено решению поставленных задач.

2. Актуальность темы диссертации. Актуальность работы А. А. Буханько обусловлена как внутренней логикой развития соответствующего раздела механики деформируемого твёрдого тела в области разработки аналитических методов решения краевых задач пластического течения в материалах и элементах конструкций с учётом предельного состояния сплошной среды, так и внешней логикой развития, обусловленной прикладными потребностями экспериментального исследования отмеченных выше материалов, да и чисто инженерными потребностями при использовании соответствующих решений в технологических задачах обработки металлов давлением и упрочняющих технологиях поверхностного пластического деформирования.

Однако строго теоретического обоснования управления силовыми и кинематическими параметрами отмеченных технологических процессов поверхностно пластического упрочнения (выглаживания), резания или обработки металлов давлением (протяжка, волочение, экструзия и т.д.) в настоящее время не имеется. Причиной этого, в том числе, является неполная разработанность математической теории пластического течения для конечных деформаций и

пределного состояния материала и отсутствие хотя бы приближённых аналитических решений, допускающих параметризацию основных силовых факторов. Имеющиеся в большом количестве численные методы применять для управления технологическими параметрами затруднительно (хотя, разумеется, и возможно). Поэтому разработка приближённых аналитических методов решения краевых задач пластического течения в области больших (конечных) деформаций и зарождения и распространения трещин в рамках модели жёсткопластического тела, являющихся определённой альтернативой многочисленным численным подходам на основе деформационной теории пластичности с известными её недостатками, безусловно является востребованной и актуальной задачей механики деформируемого твёрдого тела.

3. Основные результаты и научная новизна. Предваряя детальный анализ полученных результатов и оценку их новизны, отметим, что стратегически работа ориентирована на получение приближённых аналитических решений новых краевых задач в рамках теории пластического течения для модели жёсткопластического тела в области больших (конечных) деформаций и предельного состояния среды. Очевидно, что любое аналитическое решение является более объёмным и «богатым» по сравнению с численным решением, поскольку позволяет выполнить параметризацию моделируемого процесса по внешним силовым и кинематическим параметрам нагружения, реологическим свойствам материала, параметрам напряжённо-деформированного состояния решения краевой задачи и использовать весь аппарат непрерывной математики для детального исследования процесса.

Изложим основные элементы новизны рецензируемой диссертационной работы.

1⁰. Во второй главе диссидентант выполнил определённое обобщение решений ряда классических задач: внедрение клина в жёсткопластическую полуплоскость; раздавливание острого и усечённого клиньев гладким плоским штампом; растяжение полосы с симметричными вырезами, рассмотрев не только процессы деформирования (что было в решениях Хилла, Прандтля, Ли, Ричмонда

и других учёных), но и процессы разрушения в этих задачах при неустановившемся и установившемся пластическом течении. На основе анализа скоростей перемещений частиц в пластической области и распределения деформаций А. А. Буханько сделала вывод о возможности рассмотрения предлагаемых в задачах пластических течений с разрушением и без него. В качестве критериальных величин разрушения материала используются деформационные величины (первое главное значение тензора конечных деформаций E_1 , формула (1.43) диссертации) и удельная величина работы внутренних сил в пластической области (формула (1.44) диссертации). В случае неединственности решений эти критерии (минимаксные величины) позволяют выбрать **предпочтительное** решение и исследовать кинетику напряженно-деформированного состояния. При таком подходе появляется возможность установить границы пластического течения без разрушения и с разрушением материала. Например, при рассмотрении несимметричного пластического течения при растяжении полосы с V-образными вырезами (пункт 2.3.3 диссертации) расчётами показано, что при угле $\eta \leq 52,362^0$ пластическое течение полосы возможно лишь при разрушении материала в окрестности вершины выреза (точка A на рис. 2.9 диссертации или на рис. 2 в автореферате), т.е. теоретически установлена возможность «превращения» выреза в трещину.

2^0 . К элементам новизны следует отнести оригинальный подход трактовки механизма зарождения и развития макротрещины в точках нарушения условия непрерывности отображения конфигурации частиц в пластической области, когда две особенности поля скоростей перемещений пересекаются или совпадают в одной точке. При моделировании процесса разрушения материала разделяется этап однородного деформирования образца до момента зарождения макротрещины (доведение до предельного состояния в соответствии с введённой критериальной величиной W_{**}) и решение с разрывным полем скоростей перемещений (распространение трещины вследствие образования новых свободных поверхностей в соответствии с критериальной величиной W_*).

3⁰. Выполненные исследования поведения частиц материала и распределения деформаций в пластических областях позволили диссертанту дать классификацию «опасных» зон (в смысле возможного разрушения) на основе возможного поведения материала в окрестности пересечения особенностей поля скоростей перемещений. Показано, что для рассмотренных в главе 2 классических задач это возможно внутри пластической области на пересечениях линий разрыва поля скоростей перемещений (решение Прандтля для задач о раздавливании острого и усечённого клиньев гладким плоским штампом; в задаче о растяжении полосы с V-образными вырезами – обобщённое решение Хилла, обобщённое решение Прандтля, несимметричное пластическое течение, однородное деформирование полосы (плоского образца)), а также в окрестности свободных поверхностей (задача о внедрении клина, все симметричные решения задачи о растяжении полосы с V-образными вырезами).

4⁰. К элементам новизны следует отнести и предложенный новый вид поверхности деформационных состояний (многочлен третьей степени) упрочняющегося несжимаемого жёсткопластического тела. Отметим, что для построения поверхности нагружения вводится пропорциональность девиаторов тензоров напряжений и конечных деформаций (формула (3.7) диссертации), но в отличие от построения классической деформационной теории пластичности эта связь не является дополнительным условием для построения определяющих реологических соотношений. Условие (3.7) позволило сформулировать новое условие пластичности через второй и третий инварианты девиатора напряжений и первый инвариант тензора конечных деформаций Альманси, сохраняющее гладкость и выпуклость поверхности нагружения. Сравнение нового условия с классическими для разных видов напряжённого состояния (плоская и осесимметричная деформации, плоское напряжённое состояние, растяжение с кручением) показало, что его характер в общем отличается от классических условий пластичности (особенно при больших конечных деформациях), при этом естественным образом учитывается разносопротивляемость материала на «растяжение-сжатие» в смысле предела текучести (в диссертации это ошибочно

трактуется как «эффект Баушингера» – но об этом комментарии в замечаниях к диссертации). Важным является доказанный факт, что сохраняется характер гиперболичности системы уравнений для напряжений, состоящей из дифференциальных уравнений равновесия и условия пластиичности.

5⁰. Нестандартно выбран параметр упрочнения материала – модуль первого инварианта тензора конечных деформаций Альманси. В совокупности с введённой гипотезой единой кривой это позволило установить связь поверхности деформационных состояний и поверхности нагружения, поведение которой существенно отличается от традиционных – изотропного и трансляционного. Установлена связь удельной мощности диссипации работы внутренних сил, которая выбрана в качестве параметра повреждённости, с параметром упрочнения, и установлена связь между компонентами тензора скорости деформаций и компонентами тензора напряжений в соответствии с ассоциированным законом пластического течения при предложенном условии пластиичности. **Тем самым построена новая замкнутая теория пластического течения со всеми необходимыми её атрибутами, что позволяет ставить и решать новые краевые задачи.**

6⁰. Предложен нестандартный подход к описанию процесса распространения трещины в упругопластическом материале, как некая обратная задача о набегании упругопластической среды на абсолютно жёсткий клин. Основной результат здесь состоит в том, что предложенный подход учитывает изменение конфигурации частиц материала в пластической области, и при переходе к предельной траектории движения частиц позволяет исключить из рассмотрения особенность поля диссипации энергии типа $\frac{1}{r}$ в окрестности вершины трещины, которая создаёт основные математические проблемы при решении краевых задач для трещины в условиях неупругого деформирования. С другой стороны, диссертанту удалось в рамках неустановившегося пластического течения описать процесс затупления углового выреза, при этом нарушения сплошности (разрушения материала) не происходит.

В заключение отметим, что все сформулированные в автореферате и диссертации положения, выносимые на защиту, а также положения заключения в основном отражают действительное состояние диссертационной работы и они аргументировано и с достаточной строгостью (в рамках принятых гипотез и ограничений) доказаны.

4. Достоверность результатов диссертации сомнений не вызывает. Основные положения диссертации в достаточной мере обоснованы и логически вытекают из поставленных диссидентом целей. Достоверность результатов обеспечивается корректностью постановок «физических» и математических задач, апробированностью использованных математических методов их решения, непротиворечивостью полученных решений существующим теоретическим и экспериментальным работам других авторов.

В частных случаях результаты, полученные диссидентом А. А. Буханько, совпадают с решениями других широкоизвестных (отечественных и зарубежных) учёных.

5. Теоретическая и практическая ценность. При анализе теоретической и практической значимости полученных результатов следует отметить, что с точки зрения внутренней логической завершённости работы диссидентом сделан серьёзный шаг в области математической теории пластического течения в конструкциях в рамках модели жёсткопластического тела, обобщённой на процессы разрушения материала и предельные состояния в концентраторах напряжений. Диссидентом в рамках теории пластического течения построен ряд новых приближённых аналитических решений для ряда классических модельных задач, но в области предельного состояния материала, в том числе, выполнено моделирование распространения трещины в упругопластическом материале. Теоретические результаты являются определённым обобщением математической теории пластичности материалов в области предельных состояний.

С другой стороны, с точки зрения внешней логической завершённости работы (её связи со смежными отраслями науки и производством), очевидно, что полученные результаты имеют прозрачные пути использования, во-первых, в

технологических задачах поверхностного пластического упрочнения деталей (выглаживание) и резания, во-вторых, в технологических задачах обработки металлов давлением (протяжка, волочение и т.д.), которые имеют широкое применение в машиностроении и авиационной промышленности.

6. Апробация работы. Основные положения рецензируемой работы в достаточной мере опубликованы в научных журналах (в том числе в требуемом минимуме журналов из перечня ВАК, включая ведущие научный журналы «Доклады Академии наук», «Известия РАН. МТТ», «Прикладная механика и техническая физика») и в материалах ряда Международных и Всероссийских научных конференций. Частично работа выполнялась в рамках проектов РФФИ, проекта Минобрнауки РФ в области фундаментальных исследований, которые проходят тщательную научную экспертизу при их одобрении. Поэтому считаю, что рецензируемая диссертационная работа А. А. Буханько в достаточной мере опубликована и апробирована.

7. Диссертация и автореферат написаны ясным и понятным научным языком. Содержание диссертации достаточно полно, подробно и ясно раскрывает постановку, методы и результаты решения рассмотренных задач. Автореферат, в целом, отражает содержание диссертации. Оформление диссертации и автореферата в основном соответствует существующим требованиям.

8. Замечания по содержанию и оформлению работы. Недостатков, ставящих под сомнение справедливость какого-либо результата, в диссертации не обнаружено. Тем не менее, имеются замечания по диссертационной работе А. А. Буханько, которые можно квалифицировать как по оформлению диссертации, так и по существу работы.

По существу работы можно сделать следующие замечания.

1. Поскольку автора интересуют лишь приближённые аналитические решения, то она вводит априорно для каждой задачи (или типа задач) достаточно большое число ограничений (типичный пример – 8 ограничений для задачи главы 5 (стр. 156, 157)), и некоторые из них достаточно жёсткие с точки зрения механики деформируемого твёрдого тела. Однако «физического» обоснования

введённых предположений в полном объёме не приводится. При этом построенные решения можно классифицировать лишь как возможные решения, из которых на основании дополнительных условий (типа минимаксных в пункте 1.4 диссертационной работы и других) можно вести речь о предпочтительных решениях (в некоторых частных случаях – единственных решениях). Другими словами, при построении решений возникают бифуркационные состояния среды, и не всегда строго (с точки зрения математического аппарата) выполняется выбор одного из решений. Так, в задаче о деформировании и разрушении плоского образца (пункт 2.4) математически некорректно (просто волевым решением диссертанта) осуществлён переход от состояния однородного деформирования к состоянию локализации пластической деформации в некотором сечении образца.

2. К сожалению, диссертант ошибочно трактует понятие «эффект Баушингера», который наблюдается при повторно-статическом нагружении в условиях смены «знака» нагружения (сжатия после растяжения или наоборот в одноосном случае). В этом случае при одинаковых (по модулю) значениях предела текучести на растяжение (σ_+) и сжатие (σ_-) после повторно-статического нагружения $|\sigma_+| \neq |\sigma_-|$. В диссертационной работе фактически рассматривается разносопротивляющийся материал в смысле предела текучести на растяжение и сжатие. Об этом собственно свидетельствуют и экспериментальные данные кривых деформирования для некоторых материалов, представленные в приложении А. Поэтому в выводах по работе фразу «эффект Баушингера» следует заменить на фразу «разносопротивляющийся материал по отношению к пределу текучести».

3. В пункте 5.1.3 допущена «техническая» ошибка при построении введённого диссертантом пластического (J_p) интеграла. В формуле (5.12) во втором слагаемом пропущен множитель a , поэтому последующие формулы (5.13), (5.14), (5.16) должны содержать этот множитель в соответствующих местах. Соискатель пыталась установить инвариантность J_p относительно контура интегрирования около вершины трещины (по аналогии с классическим

J -интегралом). Однако здесь в связи с наличием множителя a (это величина отрезка OA на рис. 5.3 диссертации, т.е. $a = |OA|$) $\lim_{a \rightarrow 0} J_p = 0$, т.е. инвариантность J_p не имеет места. Поэтому равенство (5.10) $J_p \approx J$ (в автореферате формула (41)) не может выполняться. Но принципиально эта техническая ошибка не влияет на основные результаты работы.

4. Имеются вопросы по гипотезе (3.7) диссертации. Во-первых, это накладывает жёсткие ограничения на процесс нагружения, выполнение (3.7) возможно лишь в условиях простого нагружения (аналогично случаю деформационной теории пластичности), что вряд ли выполняется в условиях сложного напряжённого состояния в концентраторах (типа V-образного выреза). Во-вторых, диссертант утверждает (стр. 95 диссертации), что из пропорциональности девиаторов для тензоров напряжений и конечных деформаций (3.7) следует пропорциональность компонент тензоров напряжений и конечных деформаций Альманси, а это (в общем случае) не так. Поскольку это условие используется в дальнейших выкладках на стр. 95, то получено неверное равенство $I_\Sigma = h_E I_E$. Этот материал используется далее в пункте 4.2 при описании методики определения феноменологического параметра λ' в ассоциированном законе пластического течения, поэтому формула для λ' (стр. 141 диссертации, в автореферате она приведена на стр. 26) должна иметь другой вид. Отметим, что и данная техническая ошибка не влияет на основные результаты работы, поскольку параметры h_E и λ' входят во все решения в общем виде, без конкретизации их значений.

5. Имеются замечания по пункту 5.1 диссертации. Во-первых, здесь вводится априорно 8 предположений, однако большая их часть требует какого-либо обоснования (теоретического или экспериментального) с точки зрения механики деформируемого твёрдого тела, что не сделано. Здесь в качестве одного из предположений появляется упругая область (во всех других рассмотренных задачах она отсутствует) и утверждается, что напряжённо-деформированное состояние во внешней упругой области определяется с помощью известных

численных методов. Однако, во-первых, рецензенту абсолютно не понятно, как даже ставить краевую задачу, какими должны быть граничные условия, как задать конфигурацию упругой области, например, как определить (или задать) величину a (отрезок OA на рис. 5.3). Во-вторых, для чего введена упругая область, если она в дальнейшем не используется в решении?

Поскольку здесь строится приближённое аналитическое решение, то возникает вопрос: каким образом оценить погрешность, вносимую разрывом касательной компоненты скорости перемещений $[V_\tau]$ на участке EFG (рис. 5.2 диссертации), и можно ли вообще решить данную задачу, если учитывать этот разрыв?

6. При решении задачи о раскрытии трещины диссертант выполнил инверсию: она не рассматривает движение трещины внутрь неразрушенного материала, а зафиксировала «трещину», а материал набегает на неё с заданной скоростью \bar{m} . В этом плане в задаче на самом деле рассматривается не раскрытие трещины, а «обтекание» (с разрушением) упругопластическим материалом абсолютно жёсткого клина, поскольку при построении решения предполагается, что участки AG и AC и угол раскрытия трещины (рис. 5.3 диссертации, рис. 14 в автореферате) не изменяются. Поэтому если речь идёт о трещине, то о некоторой «специфической» трещине.

7. К сожалению, А.А.Буханько уделила мало внимания экспериментальной проверке основных результатов и экспериментальному обоснованию хотя бы части гипотез. Здесь можно отметить и определённое противоречие: с одной стороны растягиваемый плоский (или цилиндрический) образец – это объект для решения краевой задачи пластического течения и разрушения, с другой стороны – этот же образец используется для получения диаграммы деформирования и определения констант модели (в частности, величин h_E и λ' – соответственно формула (3.12) и формула на стр. 141 диссертации), которые в дальнейшем используются в решении краевой задачи для этого же образца.

Следующий ряд замечаний касается формы «подачи» и изложения материала диссертации и автореферата и оформления работы. Пониманию работы в определённой мере мешает излишняя краткость изложения некоторых материалов работы. Имеются и опечатки в формулах (но в крайне незначительном количестве).

8. В диссертации имеется некоторая «вольность» в использовании терминологии и изложении её текста. Автору нужно было в диссертации чётко дать понятие частицы (в автореферате это понятие «расшифровано»), поскольку в механике деформируемого твёрдого тела – это представительный объём, а при решении краевых задач она трактуется как «математическая» точка. Поэтому вызывает вопрос некорректность фразы: «... разрушается не область, а частица в окрестности вершины трещины» (стр. 159). Но частица – это тоже область (представительный объём).

На стр. 21 диссертации непонятна запись $\frac{df}{dn} \stackrel{(1.2.1)}{=} \frac{dt}{dn}$ (что такое t - не определено);

на стр. 22 непонятно, что означает ξ и как эта величина связана с параметром t ;

на стр. 29 имеется ссылка на формулу (1.30) и эта формула используется, хотя она приведена лишь на стр. 32; аналогично на стр. 125 имеется ссылка на формулу (4.11), а она появляется лишь на стр. 141;

на стр. 34 непонятно, что из себя представляют линии L_1 и L_2 , о которых нет никакого упоминания;

на стр. 38 приводится система четырёх нормальных дифференциальных уравнений относительно неизвестных A_{ij} ($i, j = 1, 2$), которая (как утверждается) решается численно, однако начальные условия отсутствуют;

на стр. 39 приводится некорректная фраза: «... течение является практически единственным». Как её интерпретировать с точки зрения математики (теории дифференциальных уравнений)?

формулировки критериев № 1 и № 2 на стр. 39 с точки зрения русского языка понять затруднительно.

9. Имеются опечатки в некоторых формулах. Так, на стр. 133 формула для $W_c(\sigma_B)$ не соответствует обозначениям на рис. 4.1 (б);

в параметре Одквиста (Удквиста) потерян множитель $\frac{1}{3}$ под радикалом (стр. 138) и его лучше записывать в виде

$$q = \int \sqrt{\frac{2}{3} \varepsilon_{ij}^p \varepsilon_{ij}^p} dt;$$

на стр. 149 в последней формуле (для величины $|I_E|$) должен быть знак «плюс», а не «минус», иначе $|I_E| < 0$;

на стр. 102 диссертации в предельном равенстве должен стоять модуль отношения величин $\frac{\sigma_s^+}{\sigma_s^-}$ (в автореферате это формула на стр. 18).

10. На стр. 155 непонятна фраза: «... материал является составным». Рецензенту известны однородные, неоднородные, многофазные и композиционные материалы.

График на рис. 3.7 малоинформативен, поскольку оценить визуально на нём отклонение величин $K_3^I(\delta)$ и $K_2^I(\delta)$ соответственно от значений 1 и (-1) практически невозможно. Лучше было бы дать эти отклонения в виде таблиц.

Некорректно выполнено сравнение на рис. 3.9, поскольку расчётные кривые, полученные при величине удлинения $\delta = 10\%$ и $\delta = 50\%$, нельзя сравнивать с данным по критериям текучести Мизеса и Треска – Сен-Венана, которые получены при $\delta = 0,2\%$.

При оформлении подрисунковых подписей в диссертации соискатель путает термины «пунктирная линия» и «штриховая линия».

11. Как это выглядит ни странно, но к недостаткам работы следует отнести необоснованную краткость при изложении результатов работы, так что проверка некоторых логических выводов при переходе от формулы к формуле требуют от

рецензента объёмных (на несколько листов) математических выкладок. В качестве примера приведём лишь два неочевидных перехода:

- 1) каким образом из выражений (3.16) и (3.17) получить выражение (3.44)?
- 2) совершенно неочевидно, что при выполнении соосности тензоров скоростей деформаций и девиатора напряжений не выполняется пропорциональность их компонент $\varepsilon_{ij} \neq \lambda' s_{ij}$ (глава 3).

Резюмируя, отметим, что сформулированные выше недостатки носят частный характер и ни в коей мере не влияют на общую положительную оценку работы А. А. Буханько. Технические ошибки связаны с методиками феноменологического определения констант λ' и h_E разработанной теории из экспериментальных исследований и попыткой трактовки интеграла пластиичности J_p по отношению к классическому J -интегралу, а они не влияют на построенную теорию пластического течения и разрушения материала, поскольку эти константы входят в неё в общем виде (без конкретизации).

9. Заключение по диссертации. Оценивая работу в целом, считаю, что диссертация является законченной научно-квалификационной работой, выполненной соискателем самостоятельно и на достаточно высоком научном уровне. Диссидентом решён ряд важных проблемных задач моделирования процессов неупругого деформирования (в рамках концепции жёсткопластического тела) и построен класс новых приближённых аналитических решений для классических постановок краевых задач пластического течения, но обобщённых на разрушающиеся среды и предельные состояния. Полученные результаты достоверны, выводы и умозаключения обоснованы. Работа базируется на достаточном объёме полученных теоретических результатов и вносит существенный вклад в соответствующий раздел механики деформируемого твёрдого тела.

Исходя из вышеизложенного, считаю, что диссертационная работа А. А. Буханько «Теория пластического течения в механике разрушение и её приложения» является завершённым научным исследованием, выполненным на

высоком научно-методическом уровне, соответствует специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела, и имеет важное научное и практическое значение. Рецензируемая диссертационная работа отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук ВАК Минобрнауки, а её автор – Анастасия Андреевна Буханько – заслуживает присуждения ей учёной степени доктора физико-математических наук по указанной специальности.

Официальный оппонент:

Заведующий кафедрой «Прикладная математика и информатика» Самарского государственного технического университета,
доктор физико-математических наук (01.02.04),
профессор

Радченко В. П.

Подпись Владимира Павловича Радченко заверяю
проректор по вечернему и заочному обучению,
доктор технических наук, профессор

Бичуров Г.В.

10 августа 2015 года

Служебный телефон:
+(846)3370443

E-mail: radch@samgtu.ru



Служебный адрес:

443100, г. Самара,
ул. Молодогвардейская, 244
Главный корпус СамГТУ,
Кафедра «Прикладная математика и информатика»