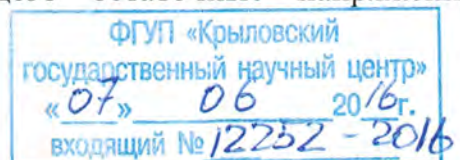


**ОТЗЫВ**

официального оппонента, доктора технических наук, доцента Ильина А.В. на диссертационную работу Колесника Алексея Михайловича «Исследование влияния технологических факторов на прочность и устойчивость прочных корпусов подводной техники», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальностям 05.08.01 «Теория корабля и строительная механика» и 05.08.04 – «Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства».

Диссертационная работа Колесника А.М. посвящена решению проблемы, занимающей пограничное положение между строительной механикой корабля и технологией его строительства. Все технологические операции заводского передела в той или иной степени влияют на итоговую прочность конструкции, и определение этой связи позволяет, с одной стороны, избежать ошибок при проектировании принятием недостаточно консервативных решений, с другой стороны - снизить чрезмерный консерватизм исторически принятой системы коэффициентов запаса. Одной из таких операций, часто применяемой при строительстве корпусных конструкций глубоководной техники, является холодное деформирование листового проката: гибка листов для изготовления обечаек, правка, холодная штамповка для изготовления сферических или торосферических переборок. К настоящему времени хорошо известно, что эти операции приводят к изменению механических характеристик металла и формированию системы остаточных напряжений, и оба эти фактора могут отразиться на прочности и ресурсе конструкции в целом. Однако до настоящего времени количественные оценки этого влияния для корпусных конструкций из высокопрочных сталей не выполнялись, а методические разработки для таких оценок отсутствуют. **Актуальность** исследований соискателя в этом направлении высока, прежде всего, в связи с решением возникшей в последнее время практической задачи: определения допустимости применения холодной штамповки для элементов корпуса без применения последующего высокого отпуска для возвращения структуры в исходное состояние и снимающего остаточные напряжения.





Возникшие в отрасли дебаты были завершены определенным «волевым» техническим решением, но его обоснованность не была доказана. Еще более актуально такое исследование применительно к новому направлению – применению в качестве материалов корпуса азотсодержащих сталей аустенитного класса, для которых такая термообработка крайне нежелательна из-за ухудшения вязкости и повышении магнитной проницаемости металла при возможном выпадении ферритной фазы.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения, изложена на 208 страницах печатного текста.

*Во введении* констатируется, что существующие теоретические разработки позволяют учесть влияние на прочность и потерю устойчивости конструкции таких технологических факторов как отклонение от идеальной формы или отклонения от идеально упругого поведения материала, но учет трансформации свойств материала и системы остаточных напряжений при холодной формовке не рассмотрен. В этом случае единственным способом учесть весь комплекс факторов является метод испытания крупномасштабных опытных конструкций, чрезвычайно дорогостоящий и практически нереальный в настоящее время. Формулируется основная цель работы – «Определение эффективности работы элементов конструкций основного корпуса ПТС при использовании методов холодного пластического формообразования и совершенствование производственных технологических процессов», а также основные задачи исследования. Приведены основные положения работы, являющиеся предметом защиты. Отмечается, что в выполненных автором исследованиях рассмотрены лишь вопросы статической прочности и потери устойчивости оболочечных конструкций, но не затрагиваются возможные последствия холодной деформации, отражающиеся на трещиностойкости материала и на циклическом ресурсе конструкции.

*Можно сделать следующее замечание по постановке задачи: утверждение, что изготовление деталей сложной формы экономически более выгодно производить методом холодной штамповки, не бесспорно. Многое зависит от уровня серийности, габаритов детали и др. Холодное деформирование тоже имеет свои "минусы", в том числе и неоднородность получаемых механических свойств, что, собственно, и является предметом дальнейшего рассмотрения работы.*

*В первой главе* рассмотрены современное состояние оценок влияния холодной деформации на прочность конструкций глубоководной техники, способы описания трансформации диаграмм деформирования металла при предварительных деформациях



обратного знака (эффект Баушингера), известные данные и методики учета отклонений от идеальной формы и наличия остаточных напряжений. Отмечено, что наиболее технологичным вариантом получения деталей с двойкой кривизной (сферические и торосферические поверхности) является применение пуансонов сферической формы и конической матрицы (необходимо отметить, что эта оснастка была впервые предложена сотрудником ЦНИИ КМ «Прометей» Б.Л. Мирошниковым), и именно на этот вариант оснастки обращено особое внимание в диссертации. Учет особенностей холоднотемпературных и горячедеформированных штамповок найден лишь в документах Германского Ллойда. Проанализированы известные подходы к описанию эффекта Баушингера. Отмечены особенности высокопрочных сталей, не подчиняющихся принципу Мазинга.

Вторым явлением, подлежащим изучению и аналитическому описанию, является т.н. «пружинение» - различие геометрии детали при максимуме нагрузки штамповки и после разгрузки. К моменту начала работы процесс был изучен, в основном, для тонкостенных изделий (автомобильная и авиационная промышленность). Кроме того, интересуются этой проблемой лишь в связи с задачей достичь требуемой геометрии, но не для оценок остаточных напряжений. Из-за отсутствия решений для толстостенных оболочек процесс штамповки элементов конструкций ГВТ фактически основан на «методе проб и ошибок», что приводит к резкому повышению ее трудоемкости.

Отмечено, что наибольшее количество работ в этой области относится к трубной продукции. Здесь показано, что влияние остаточных напряжений на прочность оказывается весьма существенным, но это есть результат совместного влияния остаточных напряжений и овальности трубы. Сама по себе овальность порядка 1% приводит к падению критических напряжений до 30% от теоретического значения. Для данной, более простой по сравнению с штамповкой элементов двойкой кривизны, задачи о холодной формовке труб имеются как численные, так и аналитические решения. Имеются указания на необходимость учета способа изготовления профильного набора обечаек – меньшего коэффициента запаса для набора, изготовленного горячим деформированием, большего – холодным. На основании выполненного обзора делается вывод об актуальности разработки методов расчета предельной статической прочности с учетом технологических операций холодного формообразования.

*В качестве замечания по главе I можно отметить, что описана лишь одна из версий физического объяснения эффекта Баушингера - известно наличие этого эффекта и для монокристаллов, что не может быть объяснено теорией микронапряжений, а связано с особенностями взаимодействия дислокаций с атомами внедрения.*



**Вторая глава** содержит результаты моделирования технологического процесса холодной штамповки деталей двойкой кривизны последовательными обжатиями – в основном, лепестков сферических или торосферических переборок – в части регистрируемых перемещений. Отмечено, что наиболее эффективно применение конической матрицы с пуансоном со сменными головками различной кривизны. Рассматривался один вариант геометрии матрицы с диаметром рабочей части 1000 мм и углом конусности  $7^\circ$ ; радиус пуансона варьировался. Для описания процесса пластического деформирования материала был принят полилинейный трансляционный закон упрочнения и модель, предложенная В.М. Рябовым для описания трансформации диаграммы деформирования при смене знака нагрузки. При моделировании рассматривалась контактная упругопластическая задача, однако получено, что мембранная компонента напряжения, возникающая из-за сил трения на опорных участках заготовки, вносит незначительный вклад в суммарное напряженно-деформированное состояние. В результате расчетов была определена зависимость остаточного радиуса кривизны заготовки от задаваемого радиусом пуансона при различных толщинах исходно круглой заготовки. Естественно, что со снижением толщины увеличивается различие получаемого радиуса и радиуса пуансона. При больших толщинах обнаружено образование зазора между заготовкой и пуансоном. Величина его зависит от толщины заготовки и (слабо) от радиуса пуансона и прочности металла. Для устранения зазора предлагается ставить стакан в матричное отверстие с определенным радиусом кривизны. Проанализирована эффективность этой технологии.

В качестве практического результата исследований представлены рекомендации по выбору радиуса пуансона, обеспечивающего получение заданного радиуса заготовки. Эти результаты оформлены в виде заявки на изобретение.

**По данному разделу имеются следующие замечания:**

1. Известно, что для оптимизации процесса формовки применяются различные комбинации последовательностей нажатий: от края к центру, от центра к краю, со смещениями по спирали или по радиусу. Полученные соискателем результаты не свидетельствуют о значимости этих приемов – действительно ли это так?
2. Одним из контролируемых параметров технологии является глубина нажатия. Было бы целесообразно привести полученные результаты к зависимостям получаемого радиуса заготовки от этого параметра.

**В третьей главе** представлены результаты анализа напряженно-деформированного состояния в заготовке, получаемого после деформирования, на примере изготовления лепестковых заготовок сферических переборок. В результате



численных исследований получены аппроксимирующие функции для определения максимальных деформаций растяжения в полюсе заготовки. Показано, что пластическая деформация после пружинения не зависит от предела текучести материала. Результаты расчетов сопоставляются с данными, полученными специалистами ЦНИИ КМ «Прометей». Отмечено, что более или менее удовлетворительное совпадение с расчетами достигается лишь в результате усреднения данных по ряду замеров, в целом же констатируется большой разброс замеров (в пределах 1.5%). Проанализированы утонения заготовок при штамповке и делается вывод о допустимости пренебречь этим фактором.

На примере стали с пределом текучести 650 МПа исследованы распределения тангенциальных и радиальных напряжений на поверхностях и по сечению заготовок. Получено, что тангенциальные и радиальные деформации совпадают в центре, в стороне – тангенциальные, как правило, выше. Из распределений деформаций по толщине заготовки следует, что имеется определенное смещение упругого ядра в сторону сжатой поверхности - то есть имеется мембранная составляющая деформации.

В главе приведены также результаты моделирования серии последовательных нажатий при штамповке лепестков концевой переборки. При моделировании принималось во внимание требование нормативной документации о необходимости проводить обжатия в зонах, удаленных не менее чем на 1/3 диаметра пуансона друг от друга. Показано, что в этом случае взаимное влияние зон деформирования отсутствует, что дает основание распространять результаты расчетов для однократного воздействия на весь процесс формовки.

*По методологии численных исследований последовательных нажатий пуансона **имеется следующее замечание:** При постановке этой части работы автор придерживается указаний существующей нормативной документации о том, что деформации более 2% за одно обжатие считаются неприемлемыми. Здесь, казалось бы, и следует внести ясность в обоснование данного ограничения на базе работы. Однако этого не сделано, и остается неясным, является ли это ограничение чрезмерно консервативным, или же, наоборот, недостаточно жестким?*

**В главе 4** анализируется влияние пластического деформирования на механические свойства высокопрочных сталей.



В качестве экспериментальной базы используются данные, полученные в Крыловском ГНЦ О.Г. Рыбакиной и В.И. Нигматуллиным. В этих экспериментах применялся метод зондирования – пробного нагружения сжатием до 0.2% пластической деформации после растяжения до различной деформации. Получено, что отношение пределов текучести при сжатии и растяжении падает до значения 0.55...0.65 при деформации до 1.4...1.8%, и при дальнейшей деформации это отношение стабилизируется. Значительно сильнее снижается предел пропорциональности - до 0.1 от исходного значения. Это свидетельствует о том, что основным следствием смены знака деформации является не изменение предела текучести, а трансформация вида диаграммы деформирования.

Основным содержанием раздела является разработка аналитических описаний изменений диаграмм деформирования при варьировании уровня деформации в первом нагружении. За основу взята идея существования универсальной безразмерной диаграммы циклического деформирования, предложенная А.С.Федоровым и развитая далее В.М.Рябовым. В результате обобщения экспериментальных данных получены поправочные коэффициенты к модифицированной диаграмме В.М. Рябова, что позволило автору практически полностью решить проблему учета операций холодного деформирования в численных расчетах МКЭ обоснованием достаточно универсальных зависимостей.

*Небольшое замечание по разделу: нигде не дано определение величины  $\sigma_2$ , фигурирующей в ряде формул.*

**Главы 5 и 6** посвящены завершающему работу анализу влияния на статическую прочность конструкций оболочечного типа технологических факторов, обусловленных предварительным холодным пластическим деформированием при штамповке и гибке. В главе 5 эти проблемы рассматриваются применительно к сферической оболочке, выполненной холодной штамповкой. За базовую ситуацию принята сфера с начальной погيبью в виде вмятины; для расчета потери устойчивости при внешнем давлении использовались известные решения, полученные для этого случая ранее сотрудниками Крыловского ГНЦ. Для определения эффекта снижения разрушающей нагрузки за счет факторов технологического происхождения использовалось моделирование МКЭ. Рассматривалось отдельное влияние трансформации диаграммы деформирования



металла и совместное влияние этого фактора и поля остаточных напряжений. Учет изменения свойств металла производилось путем выделения слоев металла, которым приписывались различные диаграммы деформирования. Получено, что существенно более значимым является первый фактор: для рассматриваемого металла с исходным пределом текучести 650 МПа снижение действительной критической нагрузки может достигать порядка  $\approx 19\%$  при низких параметрах напряженности корпуса и до 10% - при высоких значениях действующих на момент потери устойчивости напряжений. Эти результаты имеют большую практическую значимость и должны быть использованы как при оценке результатов испытаний моделей и натуральных конструкций наружным давлением, так и при принятии решений о необходимости отпуска после холодной штамповки для восстановления свойств металла.

В главе 6 представлены результаты анализа влияния операции гибки цилиндрической обечайки на нагрузку потери устойчивости подкрепленной ребрами цилиндрической оболочки. В этом случае оценка пластических деформаций и поля остаточных напряжений производилась аналитически, что представляется разумным подходом, а МКЭ использовался лишь для расчетов критической нагрузки. При гибке уровень пластической деформации существенно ниже, чем при холодной штамповке (до 0.8%), и расчетный эффект ее воздействия также оказывается существенно ниже. Аналогично случаю холодной штамповки, наличие остаточных напряжений также вносит незначительный вклад по сравнению с изменением свойств металла.

*По данным разделам можно сделать следующие замечания:*

- *в обзоре известных аналитических решений для оболочки с вмятиной следовало бы увеличить количество ссылок, не ограничиваясь упоминанием авторов.*
- *состояние металла листового проката перед гибкой вряд ли следует считать «исходным». Обычно он подвергается правке в вальцах, иногда многократной. Поэтому было бы интересно провести специальное исследование с точной записью диаграмм деформирования металла до и после гибки, отобранного в заводских условиях.*

К сделанным выше замечаниям по отдельным разделам диссертации могут быть добавлены и **следующие замечания**, носящие более общий характер:



1. Соискатель в явном виде не затрагивает важный для технологии строительства подводной техники вопрос о необходимости термической обработки заготовок после холодной штамповки, которая является достаточно трудоемкой и затратной операцией, но снимает «технологическую наследственность», являющуюся предметом изучения. Полученные количественные результаты по снижению нагрузки потери устойчивости, безусловно, позволяют проектанту принять при необходимости такое решение. Однако в рамках работы можно было бы (это следует также рассматривать как пожелание для дальнейшей работы) проанализировать типовые ситуации, когда это необходимо, и ситуации, когда прочность конструкции в целом не лимитируется снижением прочности штампованных элементов корпуса.

2. Еще одной важной стороной проблемы оценки допустимости холодной штамповки как завершающей операции является не только изменение диаграммы деформирования, но и возможные изменения характеристик материала при холодной деформации. Частичное исчерпание резерва равномерного удлинения приводит к сближению предела текучести и временного сопротивления, то есть возрастанию опасности локализации деформации при дополнительных нештатных воздействиях на корпус. При наличии относительно небольших исходных дефектах тогда возможно их развитие по вязкому механизму, но с низкой энергоемкостью. Понятно, что этот вопрос находится вне зоны исследования, но существование еще одного аспекта «технологической наследственности» следовало бы отразить в постановке задачи.

Несмотря на ряд сделанных замечаний, необходимо в итоге заключить, что **диссертационная работа Колесника А.М. является законченным и целостным научным исследованием**, направленным на решение комплекса практически важных задач, находящихся на стыке строительной механики судокорпусных конструкций и технологии судостроения. Практическая ценность работы подтверждается ее внедрением при выполнении СЧ ОКР «Барьер-К» по разработке новой немагнитной коррозионной стали для морской техники и СЧ ОКР «Оболочка-К», выполненной по договору с АО «ЦТСС», а также при выполнении НИР «Перспектива-3» в рамках федеральной целевой программы «Развитие гражданской морской техники» на 2009–2016 годы,



. Работа содержит ряд принципиально новых теоретических представлений о трансформации свойств материала при холодном деформировании, формировании остаточного напряженно-деформированного состояния при технологических операциях штамповки и гибки и влиянии этих факторов на прочность конструкций, нагружаемых внешним давлением. Автореферат и публикации автора достаточно хорошо отражают содержание работы. Диссертация изложена ясным языком, практически не содержит ошибок и опечаток.

**Работа полностью соответствует как специальности 05.08.01 «Теория корабля и строительная механика», так и специальности 05.08.04 «Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства», удовлетворяет требованиям п.9 Положения о порядке присуждения ученых степеней (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842), а ее автор – Колесник Алексей Михайлович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.**

Официальный оппонент,  
доктор технических наук, специальность  
05.02.10 «Сварка, родственные процессы и технологии»,  
доцент, заместитель генерального директора  
ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей»  
191015, Санкт-Петербург, улица Шпалерная, 49  
телефон (812) 274-18-22, email npk3@crism.ru

 Ильин А.В.

Подпись Ильина А.В. удостоверяю:  
Ученый секретарь Научно-технического совета  
ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей»  
кандидат технических наук





Фармаковский Б.Д.