

и 123621,
Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана

Инженер Ю. Н. ГУБАНОВ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА
И СВАРНЫХ ШТУЦЕРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
ТОНКОСТЕННЫХ СОСУДОВ ИЗ СПЛАВА АМг-6
В УСЛОВИЯХ МАЛОЦИКЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ**

(05.167 — «Машины и технология сварочного производства»)

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**



1123621

Губанов Ю.Н. Исследование

Работа выполнена в МВТУ им. Н. Э. Баумана.

Научный руководитель — д. т. н., профессор С. А. Куркин.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор И. В. Кудрявцев,

кандидат техн. наук, ст. научн. сотр. А. Г. Симоник.

Ведущее предприятие указано в решении Ученого Совета.

Автореферат разослан «...» 1971 г.

Защита диссертации состоится «...» 1971 г.
на заседании Ученого Совета

МВТУ им. Н. Э. Баумана по адресу: Москва, Б-5, 2-я Бау-
манская, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ
имени Н. Э. Баум

ВВЕДЕНИЕ

Производство тонколистовых сосудов, работающих под внутренним давлением, из сплавов высокой удельной прочности, за последние годы приобретает все большее значение. Основными требованиями к таким изделиям являются малый вес и высокая надежность при небольшом числе циклов высокого уровня эксплуатационной нагрузки.

В работах отечественных и зарубежных исследователей (Н.И. Марин, И.В. Кудрявцев, Д.М. Шур, А.Д. Чудновский, *Picket*, *Grigory* и др.) было показано, что в результате повторно статических нагружений происходит значительное снижение несущей способности сосудов давления по сравнению с ее значением, полученным при разрушении однократным нагружением.

В условиях малоциклового усталости большой интерес представляет поведение тонкостенных сварных сосудов из сплава АМг-6, широко используемых в различных транспортных устройствах с малым запасом прочности конструкции. В этих случаях разрушение в зоне концентрации может наступать на базе 10^3 – 10^4 циклов. Одним из слабых мест сосудов давления являются разнообразные штуцеры, ввариваемые в сферические днища. Прочность такого элемента снижается как за счет концентрации напряжений и ухудшения механических свойств металла в зоне сварного шва, так и в результате повторно статических нагружений в процессе эксплуатации. В зависимости от уровня действующей нагрузки, частоты и формы цикла нагружения, циклической характеристики металла и других факторов степень снижения прочности может быть различна. Многообразие причин такого снижения, ограниченные данные о степени их влияния на прочность соединения и недостаточная изученность поведения сплава АМг-6 в условиях повторно статичес-

кого нагружения затрудняют не только выбор оптимальных конструктивных и технологических решений, но и обоснованное назначение требований контроля качества изделия.

Целью настоящей работы является изучение причин снижения прочности сварных штуцерных соединений тонкостенных сосудов из сплава АМг-6, при повторно статическом нагружении пульсирующим циклом внутреннего давления и изыскание путей ее повышения.

Работа состоит из четырех глав и выводов.

Глава I. Малоцикловая усталость металла и конструкций.

Из обзора, сделанного в главе, видно, что проблема малоциклового усталости получила свое развитие в работах отечественных и зарубежных исследователей (И.И.Марин, С.В.Серенсен, Р.М.Шнейдерович, И.В.Кудрявцев, А.П.Гусенков, Н.А.Махутов, В.В.Ларионов, А.Д.Чудновский и др.). В частности было показано, что снижение прочности сварных конструкций в результате малоциклового усталости существенным образом зависит от ряда параметров, действующих в значительной части случаев комплексно. Объективная оценка степени их влияния на прочность и долговечность может быть осуществлена пока лишь экспериментально, так как известные методы расчета наступления разрушения еще недостаточно разработаны для практического применения.

Необходимость экспериментальной оценки прочности возникает на различных этапах проектирования и изготовления тонкостенных сосудов давления. Эта оценка должна осуществляться испытаниями, проводимыми в условиях возможно более полно отражающих характер нагружения конструкции в процессе эксплуатации. Таким условиям соответствует испытание при двухосном растяжении методом гидростатического выпучивания через круговое отверстие зашечен-



ного по контуру листового образца (А.Д.Томленов, С.А.Куркин и др.). В этом случае предельная прочность может быть получена статическим нагружением вплоть до разрушения, а эффект малоциклового усталости выявлен повторно статическим нагружением на различных уровнях максимального напряжения пульсирующего цикла. Для проведения повторно статических испытаний в условиях двухосного растяжения необходимо создание специальной установки.

В соответствии с этим задачи работы были сформулированы следующим образом.

1. Создание установки, позволяющей в условиях двухосного растяжения осуществлять испытание листового металла, сварных соединений узлов и макетов тонкостенных сосудов статическим, повторно статическим и долговременным циклом нагружения.

2. Разработка методики испытаний листового металла, круговых сварных швов и сварных штуцерных соединений в условиях двухосного растяжения пульсирующим циклом нагрузки.

3. Исследование поведения листового металла в условиях малоциклового усталости при двухосном растяжении.

4. Оценка влияния на прочность и долговечность технологии сварки и конструктивного оформления сварного штуцерного соединения тонкостенных сосудов из сплава АМг-6.

Глава 2. Оборудование и методика проведения испытаний.

На основе обзора существующих устройств для испытаний на малоцикловую усталость образцов и конструкций, - сформулированы требования к установке, необходимой для выполнения поставленной задачи. В соответствии с этими требованиями автором была спроектирована и изготовлена в МВТУ им. Баумана установка

УДР-2 для испытаний листовых образцов, сварных узлов и макетов тонкостенных сосудов давления. Установка отличается от ранее разработанной при непосредственном участии автора установки УДР-1^{х)}, электрической и гидравлической схемами, позволяющими производить статическое, повторно-статическое и долговременное нагружение.

Исследование малоциклового усталости листового металла и сварных соединений в условиях двухосного растяжения выполнялось в следующем порядке.

1. Испытание листовых образцов из металла в состоянии поставки, с целью определения его механических характеристик при статическом растяжении до разрушения и изучения поведения металла при повторно статическом нагружении пульсирующим циклом.

2. Испытание образцов с концентратором напряжений, с целью изучения процесса накопления пластической деформации в зоне концентрации.

3. Испытание образцов со сварным круговым швом и вварным конструктивным элементом в виде "заплатки" или штуцера, с целью оценки влияния технологических и конструктивных факторов на прочность и долговечность сварного соединения.

В качестве образца была принята листовая заготовка в виде диска диаметром 475 мм или сформованная из нее через матрицу диаметром 320 мм выпучина.

При гидростатическом выпучивании через круговое отверстие заземленного по контуру образца в зените выпучины имеет место плоско напряженное состояние с равными компонентами $\sigma_1 = \sigma_2$.

х) Авторское свидетельство № 169849 на имя С.А.Куркина, В.Ф. Лукьянова, Д.Н.Губанова, В.А.Винокурова и В.А.Парахина.

Нагружая образец до разрушения ступенями и подсчитывая на каждой из них напряжение, как $\sigma_{уср} = \frac{P \cdot R}{2 t_0}$ или $\sigma_i = \frac{P \cdot R}{2 t}$ и пластическую составляющую логарифмической деформации в направлении толщины $\epsilon_{3p} = \ln \frac{t}{t_0}$ ($\sigma_{уср}$ и σ_i - условные и истинные напряжения в зените выпучины, P - давление под образцом, R - радиус кривизны в зените выпучины, t_0 и t - толщина листа до испытания и в процессе нагружения). получали зависимость $\sigma_{уср} = \psi(\epsilon_{3p})$ и $\sigma_i = f(\epsilon_p)$ или $\sigma_i = f(\epsilon_{ip})$, так как для изотропного материала имеют место соотношения $\sigma_i = \sigma_i$ и $\epsilon_{3p} = |\epsilon_{ip}|$. Оценку изменения механических свойств металла в процессе повторно статического нагружения производили, сравнивая диаграмму деформирования материала в исходном состоянии с аналогичной диаграммой снятой при испытаниях образца, подвергнутого предварительно многократному нагружению напряжением выше предела течи. Влияние характера зависимости $\sigma = f(\epsilon)$ на закономерности развития деформации и вид разрушения при повторно статическом нагружении устанавливали, испытывая листовые образцы на различных уровнях нагрузки, выбираемых по характерным участкам диаграммы деформирования металла. Источником разрушения элементов конструкций при малом числе циклов, как правило, являются процессы деформирования в зонах концентрации напряжений. Для изучения характера их протекания был выбран концентратор в виде круглого отверстия, диаметром равным толщине листа. Концентратор наносили в середине листового образца или в зените оформленной выпучины. После высверливания, отверстие изнутри заклеивали резиной. Для определения деформации были использованы два способа измерений. В первом случае образец нагружали внутренним давлением ступенями, по уровню нагрузки или числу циклов. После каждой ступени образец вынимали из машины и с помощью

скобы с индикаторной головкой и инструментального микроскопа производили измерение утонения у кромки отверстия и приращение его диаметра. Такие измерения позволяли составить представление о распределении пластической деформации вокруг отверстия и характере их накопления от ступени к ступени нагружения вплоть до разрушения образца. Во втором случае, измерение ограничивали только замером диаметра отверстия, которое осуществлялось непрерывно в процессе статического или повторно статического нагружения образца. Измерение производили специально спроектированным устройством с индикаторной головкой. В процессе нагружения закатого по контуру плоского образца кривизна его выпучины изменяется сильнее, чем кривизна поверхности реального сосуда, нагруженного внутренним давлением.

Это обстоятельство может оказать существенное влияние на результаты испытаний, в особенности, если сварное соединение или ввариваемый элемент обладает жесткостью заметно большей, чем жесткость листовой оболочки. Поэтому в качестве образца для испытаний круговых сварных соединений на УДР-2 была принята листовая заготовка с выпучиной, формование которой производилось на той же установке под давлением несколько большим, чем давление, создаваемое при последующем испытании. В этом случае в процессе нагружения деформирование металла протекало только в зоне разупрочнения от сварочного нагрева и кривизна образца оставалась неизменной. При испытании таких образцов на различных уровнях нагрузки, величину максимального давления пульсирующего цикла находили по формуле
$$P_{исп} = \frac{\sigma_{исп} \cdot 2t}{R}$$
. Аргоно-дуговая сварка образцов выполнялась на заводе по обычно принятой для сплава АМг-6 технологии. После сварки все образцы подвергались визуальному и рентгеновскому контролю. Прочность сварного

штуцерного соединения зависит от ряда технологических и конструктивных факторов. Избирательная оценка каждого из них, при испытании сварного штуцера весьма трудна. Поэтому была принята схема, позволяющая, переходя от одного типа образца к другому, последовательно оценивать влияние режима сварки, качества сборки, геометрии ввариваемого элемента и т.п. на прочность соединения. Так испытание образцов с точечным переплавом позволило судить о снижении прочности металла шва в результате многократного нагрева и плохого окончания сварки (наличия кратера).

Технология заварки - "замка" (начало перекрытия шва) и способы повышения статической прочности и долговечности, при повторно статическом испытании сварного соединения оценивали на образцах с круговым швом (диаметр 80 мм), полученным переплавом металла. Переход на вварку "заплатки" диаметром 80 мм, не приводя к существенному изменению режима и технологии выполнения соединения, позволил дополнительно установить влияние качества сборки и перемещения кромок при сварке. Испытания штуцерных соединений дополняли информацию, показывая влияние жесткости вварного элемента и давали характеристику прочности узла в целом. Для изготовления образцов были использованы листы сплава АМг-6 толщиной 3 мм в отожженном и полунагартованном состоянии. Испытания проводили при различных значениях максимального напряжения пульсирующего цикла нагрузки в диапазоне от разрушения однократным нагружением до разрушения при $3 \cdot 10^3 + 4 \cdot 10^3$ циклов. Частота нагружений составляла 15-20 циклов в минуту.

Глава 3. Особенности накопления пластических деформаций при повторно статическом нагружении.

Испытания гладких листовых образцов из сплава АМг-6 и ма-

малоуглеродистой стали показали, что под действием повторных нагружений пульсирующим циклом внутреннего давления, выше предела текучести, происходило повышение временного сопротивления материала и изменение его деформационной характеристики.¹ Эти изменения ярко выражены у сплава АМг-6 в отожженном состоянии и менее заметны при испытании АМг-6Н и малоуглеродистой стали.² Металл приобретает свойства нагартованного, но осуществляется это упрочнение при существенно меньшей деформации,³ чем при холодном деформировании растяжением или прокаткой.

Повторно статическое испытание листовых образцов при различных значениях действующей нагрузки показало, что характер накопления пластических деформаций и вид разрушения определяется деформационной характеристикой материала и уровнем максимальных напряжений пульсирующего цикла. Для сплава АМг-6 характерно усталостное разрушение во всем диапазоне нагрузок вплоть до напряжений, близких к напряжениям статического разрушения. Характер разрушения образцов из малоуглеродистой стали меняется с усталостного на квазистатический по мере приближения максимального напряжения пульсирующего цикла нагрузки к пределу прочности материала.

Измерения на образцах из сплава АМг-6 с концентратором в виде отверстия показали, что по мере увеличения числа нагружений (при заданном цикле) зона накопления пластических деформаций все более локализуется вблизи кромки отверстия, причем этот процесс продолжается вплоть до разрушения.

При высоком уровне нагружения величина пластической деформации в зоне концентрации напряжений во втором цикле еще достаточно велика и составляет примерно 0,3-0,5 от ее величины при первом нагружении.

Предварительная статическая перегрузка повышает долговечность образца из АМг-6 с отверстием при последующем повторно статическом нагружении по сравнению с образцом, испытанным при том же уровне напряжений, но без перегрузки. Подсчет полного размаха напряжений в концентраторе по деформации отверстия с использованием деформационной характеристики материала, снятой на контрольных образцах, показал, что цикл нагружения в зоне концентрации напряжений по мере увеличения уровня средних напряжений меняется с знакопостоянного (растяжение) на знакопеременный асимметричный (растяжение-сжатие). Величина напряжений сжатия в обоих случаях (АМг-6 и малоуглеродистая сталь) не достигает предела текучести материала.

Характер разрушения образцов с отверстием из сплава АМг-6 оставался усталостным вплоть до напряжений близких к напряжениям статического разрушения образца, а у малоуглеродистой стали менялся с усталостного при низком уровне средних напряжений на квазистатический при более высоком.

Глава 4. Результаты испытаний сварных соединений сплава АМг-6.

Выполнение намеченной программы последовательных испытаний различных типов сварных образцов позволило установить следующее. Долговечность образца с точечным трехкратным переплавом металла снижается по сравнению с однократным переплавом и резко падает в случае плохой заварки кратера.

Двукратный переплав металла заметно снижает статическую прочность кругового сварного шва. По мере роста числа циклов это снижение уменьшается и в области долговечности $3 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^3$ кривые однократного и двукратного переплава сливаются. Особенностью испытания кругового сварного шва является то, что в отличие от обычных одноосных испытаний, когда образцы вырезают-

оя из участка шва, заваренного на установившемся режиме, в условиях двухосного растяжения, нагружению подвергается весь шов, включая зону перекрытия при окончании сварки. Для этого участка нередко наблюдается ухудшение формы проплава или даже частичное несплавление, что приводит к увеличению концентрации напряжений в области, где механические свойства металла снижены повторным нагревом. Анализ разрушений образцов показал, что снижение прочности соединения из-за неблагоприятной формы проплава, в начале перекрытия, весьма существенно и сравнимо с влиянием такого дефекта, как частичный непровар. Трещины, поры и окисные пленки, расположенные на поверхности проплава, вне основного силового потока, как правило, не являются причиной преждевременного разрушения, но если цепочка пор расположена по зоне сплавления со стороны проплава, в месте наибольшей концентрации напряжений, то она вызывает резкое снижение прочности сварного шва.

Прочность и долговечность образцов с вварной "заплаткой" снизилась по сравнению с круговым переплавом. Это снижение особенно заметно при вварке "заплатки" со смещением кромок. При изготовлении тонкостенных конструкций отсутствие хотя бы незначительного смещения кромок свариваемых деталей избежать трудно, как из-за неточности сборки, так и вследствие коробления кромок при сварке. Анализ причин разрушений, начало которых не совпадало с "замком", показал, что в этом случае источником разрушения оказывалось место наибольшего смещения кромок или перемены его знака.

Статическая прочность сварного ступерного соединения по сравнению с прочностью кругового переплава снижается незначительно (примерно также как и у образцов с вварной "заплаткой"), но с ростом числа циклов повторно статического нагружения снижение

уровня разрушающих напряжений становится все более заметным. Трехкратный переплав сварного шва штуцера приводит к значительному снижению статической прочности (30-35%) соединения. Дальнейшее снижение уровня разрушающих напряжений от действия повторных нагружений менее интенсивно, чем это имело место у образцов с однократной заваркой.

Изменение геометрических размеров штуцера, влияющих на его жесткость, показало, что с уменьшением диаметра фланца долговечность образцов снижается, а с уменьшением диаметра бобышки - повышается.

Кривые усталости образцов из АМг-6 располагаются ниже кривых разрушения аналогичных образцов, выполненных из сплава АМг-6Н, но имеют тенденцию к пересечению в области большей долговечности (несколько тысяч циклов). Аналогичная картина наблюдается для этих материалов при повторно статическом нагружении образцов с отверстиями.

Разрушение сварных образцов имеет усталостный характер. Трещина начинается, как правило, со стороны проплава и распространяется по зоне сплавления, расположенной на внешней окружности кругового шва. Исключение составляют образцы с трехкратным переплавом металла шва и сваренные со смещением кромок, разрушение которых происходит по зоне сплавления у внутренней окружности соединения.

Таким образом, сравнение зависимостей $\sigma = f(N)$ показало, что кривые разрушения для кругового переплава, вварной "заплатки" и вварного штуцера, располагаются одна ниже другой и приобретают все более крутопадающий характер, показывающий, что при переходе от одного типа образца к другому накопление возникающих погрешностей приводит, в конечном счете, к росту кон-

центраций напряжений и снижению как статической прочности так и долговечности соединения при повторно статическом нагружении. Повторный и трехкратный переплав сварного шва, ухудшая механические свойства металла, приводит к снижению статической прочности и более пологому очертанию кривых усталости. Такой же характер кривых разрушения у образцов с "заплаткой" и штуцером, сваренных со смещением кромок.

Результаты испытаний показывают, что когда сварка выполнена хорошо и технологические дефекты отсутствуют, достигается достаточно высокая прочность кругового сварного соединения сплава АМг-6, даже в случае повторной заварки шва. В тоже время, наличие технологических дефектов, наложение одной погрешности на другую, особенно в зоне повторного нагрева, может привести к наступлению разрушения соединения в области рабочих напряжений конструкции.

Для повышения прочности сварного соединения была проверена эффективность таких мероприятий, как:

- удаление проплава заподлицо с основным металлом,
- улучшение технологии выполнения зоны перекрытия шва,
- пластическое деформирование зоны сварного соединения.

Проведенные испытания показали, что удаление проплава заметно повысило долговечность соединения при повторно статическом нагружении. В области высоких напряжений, близких к статическому разрушению эффект от этой операции снижается.

Долговечность образцов, сваренных с плавным нарастанием тока в начале перемещения горелки, резко возросла. Этот прием, по сравнению с обычно применявшимся только плавным снижением тока при заварке кратера, позволил значительно улучшить геометрию проплава и практически полностью устранить резкие изменения

его формы в начале перекрытия. В результате предотвращения концентрации напряжений в наиболее опасной для кругового шва зоне, долговечность сварного соединения оказалась заметно выше, чем у образцов, сваренных по обычной технологии, но с удаленным проплавом.

Пластическое деформирование зоны сварного соединения производилось обжатием усиления кругового шва, лежащего на подкладке, кольцевым пуасоном под прессом или нагружением образца внутренним давлением, превышающим его величину при последующем повторно статическом испытании. Как в том так и в другом случае долговечность образцов повысилась на 50-100% по сравнению с долговечностью образцов в состоянии после оварки и испытанных при этом же уровне нагрузки. Наибольший эффект был получен при трехкратном нагружении образца напряжением на 10 кг/мм^2 превышающим уровень последующих испытаний.

Таким образом, кроме мероприятий по устранению дефектов технологии, дополнительным резервом прочности кругового соединения может быть пластическое деформирование зоны сварного шва. Естественно такая операция наиболее эффективна для хорошо заваренного шва.

Испытания показали, что примененные методы позволяют приблизить прочность и долговечность сварного соединения к прочности и долговечности основного металла.

Завершающей операцией приемных испытаний сосудов является контрольное нагружение внутренним давлением. Результаты испытаний образцов с отверстием показали, что при высоких средних напряжениях величина пластической деформации в зоне концентрации напряжений во втором цикле еще достаточна велика. Поэтому случай разрушения реального узла или конструкции при высоком уровне

не нагрузки на втором нагружении весьма вероятен. Подтверждением этого служат ряд сварных образцов, разрушившихся таким образом, в то время как остальные кроме разрушенных однократным нагружением, выдерживали не менее 100 циклов. Поэтому представляется целесообразным контрольное нагружение тонкостенных сосудов из сплава АМг-6 производить три раза. Такое испытание исключает возможность разрушения сосудов одноразового использования, при напряжениях ниже контрольных и повысит надежность работы сосудов, нагружаемых многократно.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Для обоснованного выбора листового металла, технологии сварки и конструктивного оформления сварных узлов тонкостенных сосудов, определение прочности и долговечности целесообразно производить в условиях малоциклового нагружения двухосным растяжением.

2. Разработана установка УДР-2 и методика проведения повторно статических испытаний листового металла, круговых сварных соединений и вварных конструктивных элементов пульсирующим циклом внутреннего давления.

3. Повторно статическое нагружение сплава АМг-6 сопровождается дальнейшим, после первого цикла, упрочнением материала, которое происходит без существенного изменения сечения и может служить дополнительным резервом статической прочности конструкции вследствие повышения разрушающих условных напряжений.

4. Показано, что характер процесса деформирования и вид разрушения листового металла при двухосном растяжении пульсирующим циклом определяется деформационной характеристикой материала и уровнем напряжений повторно статического нагружения.

5. Экспериментально показан процесс локализации деформаций и изменение характера нагружения в зоне концентрации напряжений с мягкого на все более жесткий по мере роста числа циклов, при повторно статическом нагружении образца с отверстием до разрушения.

6. Испытания образцов с вварным штуцером показали, что:

а) наиболее слабым местом хорошо заваренного шва является зона перекрытия при окончании сварки;

б) разрушение соединения начинается со стороны проплава и распространяется в зоне сплавления;

в) трехкратный переплав металла шва при исправлении дефектов сопровождается значительным снижением как статической прочности так и долговечности соединения;

г) при хорошем качестве сварки прочность соединения достаточно высока даже при повторном переплаве металла шва. Наличие технологических дефектов, особенно в зоне повторного нагрева, может привести к наступлению разрушения соединения в области рабочих напряжений конструкции.

7. Показано, что прочность и долговечность сварного штуцерного соединения может быть существенно повышена: улучшением формы проплава в зоне перекрытия, удалением проплава, пластическим деформированием сварного соединения.

8. Испытание образцов на установках УДР-2 может служить оперативным способом оценки технологических вариантов сварки и конструктивного оформления сварных штуцерных соединений.

9. При высоком уровне напряжений на втором цикле нагружения сплава АМг-6 деформация в зоне концентрации еще достаточно велика и может привести к разрушению сварного соединения. Поэтому

контрольные нагружения при испытаниях сосудов из этого сплава целесообразно производить три раза.

10. Установка типа УДР-2 внедрена на предприятии, а проведенное исследование позволило приступить к работе по экспериментальному обоснованию рекомендаций, регламентирующих величины допускаемых дефектов сварных соединений тонкостенных сосудов из АМг-6.

Диссертация содержит 174 стр., 73 рисунка и 18 таблиц. В списке литературы приведено 88 источников.

х

х

х

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах и доложено на конференциях:

1. Куркин С.А., Лукьянов В.Ф., Парахин В.А., Губанов Ю.Н. Установка для испытаний макетов сварных тонкостенных сосудов в условиях двухосного растяжения, "Сварочное производство", 1965, № 5.
2. Губанов Ю.Н., Куркин С.А. Исследование поведения листового металла в условиях двухосного растяжения при пульсирующем цикле нагружения, "Известия высших учебных заведений", № 3, 1969.
3. Губанов Ю.Н., Антонов Е.Г., Куркин С.А. Исследование прочности сварных штуцерных соединений тонкостенных сосудов давления в условиях малоциклового нагружения. Труды МВТУ, № 133, 1969.
4. Вершинский А.В., Губанов Ю.Н., Панферов Н.М., Сагалевич В.М. О прочности штуцерных сварных соединений. "Известия высших учебных заведений", № 9, 1970.

5. Куркин С.А., Лукьянов В.Ф., Губанов Д.Н. и др., Модернизированная установка для испытания листового металла и сварных соединений в условиях двухосного растяжения. Сб. докладов VI научно-технической конференции сварщиков Западного Урала "Передовая технология в производстве сварных конструкций", Пермь, 1968.
6. Губанов Д.Н. Исследование прочности сварных штуцерных соединений тонкостенных сосудов в условиях малоциклового усталости. Тезисы докладов научно-технической конференции по технологии и оборудованию сварочного производства, Тула, 1968.

