

01.022

B 235

На правах рукописи

Министерство высшего и среднего специального
образования СССР

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

ВАШУК ВАДИМ АРТЕМЬЕВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТРУБАХ
ПОЛУНЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ

Специальность 01.022 -

"Сопротивление материалов и строительная механика"

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание учёной степени кандидата
технических наук

Челябинск, 1972

ЧПИ

621.774.1(043)

Читальный зал
«Профессорский»

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте
имени Ленинского комсомола.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
Д.А.ГОСФЕЛЬД.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
О.А.БАКШИ, кандидат технических наук, доцент С.И.ИВАНОВ.

Ведущее предприятие - Синарский трубный завод
(г.Каменоя-Уральский).

Публичная защита состоится на заседании Совета по присужде-
нию учёных степеней инженерно-строительного факультета Челябинс-
кого политехнического института имени Ленинского комсомола
" " 1972 года в _____ час. в ауд. _____.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан " " 1972 года.

Отзывы в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения,
просим направлять по адресу: 454044, Челябинск-44, проспект
имени В.И.Ленина, 76, Челябинский политехнический институт имени
Ленинского комсомола, учёному секретарю Совета.

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА -
кандидат технических наук, доцент *Стан* (В.В.Капанов)



На правах рукописи

Министерство высшего и среднего специального
образования С С С Р

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

ВАШУК ВАДИМ АРТЕМЬЕВИЧ

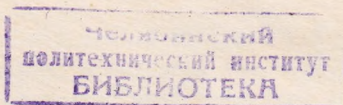
ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТРУБАХ
ПОЛУНЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ

Специальность 01.022 -

"Сопротивление материалов и строительная механика"

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание учёной степени кандидата
технических наук



Челябинск, 1972

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте имени Ленинского комсомола.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор Д.А.ГОХФЕЛЬД.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор О.А.БАКШИ, кандидат технических наук, доцент С.И.ИВАНОВ.

Будущее предприятие - Сикарский трубный завод (г.Каменск-Уральский).

Публичная защита состоится на заседании Совета по присуждению учёных степеней инженерно-строительного факультета Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола "___" _____ 1972 года в _____ час. в ауд. _____.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "___" _____ 1972 года.

Отзывы в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 454044, Челябинск-44, проспект имени В.И.Ленина, 76, Челябинский политехнический институт имени Ленинского комсомола, учёному секретарю Совета.

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА -
кандидат технических наук, доцент *С.В.Капанов* (В.В.Капанов)

Одной из основных задач, поставленных XXIV съездом КПСС перед отечественной промышленностью, является коренное улучшение качества выпускаемой продукции, создание новых машин и конструкций, отвечающих по технико-экономическим показателям передовым достижениям мировой науки и техники. Решение этих вопросов связано с повышением надёжности и долговечности машин, где немаловажное значение имеет проблема остаточных напряжений. Возникшая при большинстве технологических операций изготовления деталей и конструкций, остаточные напряжения могут оказывать существенное влияние на их работоспособность. В практике остаточные напряжения успешно используются для повышения несущей способности деталей машин, их усталостной прочности, износостойкости. В то же время неблагоприятно распределённые остаточные напряжения способствуют хрупкому разрушению, коррозии. Релаксация остаточных напряжений приводит к короблению изделий. Исследование закономерностей возникновения, величин и законов распределения остаточных напряжений, а также возможностей их регулирования в изделиях, полученных различными способами (особенно с помощью новых, малоизученных технологических процессов), является актуальной задачей.

В металлургической промышленности нашей страны для изготовления напорных труб большого диаметра (300—1000 мм) широкое распространение в последние годы получил сравнительно новый полунепрерывный способ литья с применением вертикального водоохлаждаемого кристаллизатора. Доля труб, изготавливаемых этим прогрессивным способом литья в общем объёме литых труб быстро увеличивается, в связи с чем вопросы улучшения их качества и надёжности приобретают первостепенное значение.

Одним из видов брака труб полунепрерывного литья является их повышенная склонность к хрупкому разрушению. Образование трещин наблюдается на различных стадиях технологического процесса их изготовления, а также в готовых трубах при гидротренировке, от слабых ударов во время транспортировки или в условиях эксплуатации.

Разрушения подобного типа в отливках связывают с существованием в них значительных остаточных напряжений. В специальной литературе по литью приведены многочисленные примеры, когда остаточные напряжения явились основной причиной самопроизвольного разрушения отливок в процессе их изготовления и хранения, обра-

Одной из основных задач, поставленных XXIV съездом КПСС перед отечественной промышленностью, является коренное улучшение качества выпускаемой продукции, создание новых машин и конструкций, отвечающих по технико-экономическим показателям передовым достижениям мировой науки и техники. Решение этих вопросов связано с повышением надёжности и долговечности машин, где немаловажное значение имеет проблема остаточных напряжений. Возникая при большинстве технологических операций изготовления деталей и конструкций, остаточные напряжения могут оказывать существенное влияние на их работоспособность. В практике остаточные напряжения успешно используются для повышения несущей способности деталей машин, их усталостной прочности, износостойкости. В то же время неблагоприятно распределённые остаточные напряжения способствуют хрупкому разрушению, коррозии. Релаксация остаточных напряжений приводит к короблению изделий. Исследование закономерностей возникновения, величин и законов распределения остаточных напряжений, а также возможностей их регулирования в изделиях, полученных различными способами (особенно с помощью новых, малоизученных технологических процессов), является актуальной задачей.

В металлургической промышленности нашей страны для изготовления напорных труб большого диаметра (300-1000 мм) широкое распространение в последние годы получил сравнительно новый полупрерывный способ литья с применением вертикального водоохлаждаемого кристаллизатора. Доля труб, изготавливаемых этим прогрессивным способом литья в общем объёме литых труб быстро увеличивается, в связи с чем вопросы улучшения их качества и надёжности приобретают первостепенное значение.

Одним из видов брака труб полупрерывного литья является их повышенная склонность к хрупкому разрушению. Образование трещин наблюдается на различных стадиях технологического процесса их изготовления, а также в готовых трубах при гидропрессовке, от слабых ударов во время транспортировки или в условиях эксплуатации.

Разрушения подобного типа в отливках связывают с существованием в них значительных остаточных напряжений. В специальной литературе по литью приведены многочисленные примеры, когда остаточные напряжения явились основной причиной самопроизвольного разрушения отливок в процессе их изготовления и хранения, обра-

возвращения трещин с незначительных механических воздействий при зачистке, падении с небольшой высоты и т.д. Влияние остаточных напряжений на прочность возрастает в случае, если материалом отливки является такой малопластичный материал, как чугун.

Данная работа посвящена определению величины и закона распределения остаточных напряжений (макронапряжений) в чугунных трубах, изготовленных полунепрерывным способом литья, анализу механизма образования остаточных напряжений, поиску различных путей их уменьшения. Она состоит из введения, пяти глав и заключения (всего 190 страниц, из них 58 иллюстраций).

Во введении освещены вопросы влияния остаточных напряжений на работоспособность конструкций, приведён краткий обзор литературы по механическим методам определения остаточных напряжений в телах вращения, указаны основные задачи исследования.

Первая глава диссертации посвящена разработке методики определения остаточных напряжений в тонкостенных трубах большого диаметра, учитывающей геометрические и физические особенности литых труб. Вследствие особенностей процесса изготовления трубы полунепрерывного литья имеют не строго цилиндрическую форму, наблюдается некоторая их овальность. Толщина стенки в различных точках периметра трубы не одинакова (она может плавно изменяться в незначительных пределах). Кроме того, структура материала и, как следствие этого, физико-механические свойства существенно изменяются по толщине стенки. Это обстоятельство не позволяет использовать для исследования остаточных напряжений в трубах полунепрерывного литья известные механические методы определения этих напряжений в однородных трубах (Г.Закса, Н.Н.Давиденкова, метод колец и полосок). Разработанные в последнее время методы определения остаточных напряжений в неоднородном полом цилиндра (И.И.Дехтерь и Н.И.Нижорич) или в многослойном цилиндре (С.И.Иванов и В.И.Глазырин), также неприменимы в данном случае, так как основаны на замере деформаций при последовательном удалении тонких цилиндрических слоёв путём обточки или расточки, либо с помощью химического или электролитического травления. Отклонение от строгой цилиндрической формы не позволяет путём расточки или обточки снимать тонкие цилиндрические слои постоянной толщиной во всех точках периметра исследуемых труб. Выполнение этой операции

путём травления не представляется возможным, так как графитные включения в сером чугуна, являясь как бы надрезами в его металлической основе, исключают равномерное отравливание слоёв.

По предлагаемой в данной работе методике для определения остаточных напряжений в тонкостенной трубе большого диаметра из неё вырезается прямоугольный в плане темплет, с которого в дальнейшем последовательно снимаются концентрические тонкие слои, имеющие в окружном направлении кривизну, соответствующую текущему радиусу. В процессе вырезки темплета и снятия слоёв измеряются продольные и окружные деформации внутренней или наружной поверхностей. Для этого используются тензодатчики сопротивления, предварительно наклеенные в центре темплета в окружном и продольном направлениях на внутренней поверхности трубы (если в дальнейшем слои с темплета предполагается снимать снаружи) или на наружной поверхности (при снятии слоёв изнутри).

При выводе расчётных зависимостей принимались допущения об упругом характере деформаций в процессе разгрузки, а также о постоянстве остаточных напряжений по длине и их осесимметричном распределении в любом поперечном сечении трубы. Напряжённое состояние считалось плоским (для тонкостенных труб радиальными напряжениями можно пренебречь $\sigma_r = 0$, осевые и окружные нормальные напряжения изменяются только по радиусу $\sigma_z = \sigma_z(r)$, $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$).

В соответствии с основным принципом определения остаточных напряжений в механических методах, согласно которому на обозначенных поверхностях тела прикладываются обратные остаточные напряжения, было рассмотрено нагружение темплета, эквивалентное вырезке из трубы и последующему снятию слоёв.

Большой диаметр тонкостенной трубы и незначительные разме-

ры темплетта в плече (порядка нескольких толщин стенки трубы), позволив без существенной погрешности пренебречь кривизной темплетта и рассмотреть его как плоскую пластинку. На основе теории тонких пластин получены формулы для нахождения остаточных напряжений в пластине с переменным по толщине модулем упругости методом плоских срезов при замере деформаций на поверхности пластины по мере снятия оловя датчиками сопротивления.

Для определения осевых и окружных остаточных напряжений в произвольном слое трубы получены следующие расчётные зависимости:

$$\sigma_z(\alpha) = \frac{1}{1-\mu^2} [F_z(\alpha) + \mu F_\theta(\alpha)] ;$$

$$\sigma_\theta(\alpha) = \frac{1}{1-\mu^2} [F_\theta(\alpha) + \mu F_z(\alpha)] ,$$

где

$$F_z(\alpha) = E(\alpha) \frac{h-\alpha-e}{e} \varepsilon_{z1} - \frac{1-\mu^2}{\frac{1}{D_0(\alpha)} - \frac{1}{D_2(\alpha)}} \frac{1-\mu^2}{[h-\alpha-e(\alpha)] e(\alpha)} \frac{d\varepsilon_z}{d\alpha} - E(\alpha) \int_0^\alpha \lambda(\xi) \frac{d\varepsilon_z}{d\xi} d\xi ;$$

$$F_\theta(\alpha) = E(\alpha) \frac{h-\alpha-e}{e} \varepsilon_{\theta 1} - \frac{1-\mu^2}{\frac{1}{D_0(\alpha)} - \frac{1}{D_2(\alpha)}} \frac{1-\mu^2}{[h-\alpha-e(\alpha)] e(\alpha)} \frac{d\varepsilon_\theta}{d\alpha} - E(\alpha) \int_0^\alpha \lambda(\xi) \frac{d\varepsilon_\theta}{d\xi} d\xi .$$

Здесь h - толщина стенки трубы;
 α - текущая толщина удалённого слоя темплетта;
 $E(\alpha)$ - модуль упругости в слое (α) ;

$\frac{d\varepsilon_z}{da}$ и $\frac{d\varepsilon_\theta}{da}$ - производные от функций изменения осевой и окружной деформаций поверхностного слоя темплета в зависимости от толщины удалённого слоя (a),

$$D_0(a) = \int_{-e(a)}^{h-a-e(a)} E(y) dy \quad \text{и} \quad D_2(a) = \int_{-e(a)}^{h-a-e(a)} E(y) y^2 dy -$$

упруго-геометрические характеристики оставшейся части темплета, толщиной $h-a$, где $e(a)$ определяет положение основной поверхности;

$0 \leq \xi \leq a$ переменная интегрирования;

$$\lambda(\xi) = \frac{\frac{1}{D_0(\xi)} + \frac{1}{D_2(\xi)} [h-a-e(\xi)][h-\xi-e(\xi)]}{\frac{1}{D_0(\xi)} - \frac{1}{D_2(\xi)} [h-\xi-e(\xi)] e(\xi)},$$

где $D_0(\xi)$ и $D_2(\xi)$ - упруго-геометрические характеристики оставшейся части темплета толщиной $h-\xi$;

$e(\xi)$ - расстояние основной поверхности от поверхности о наклеенными тензодатчиками.

Для расчёта остаточных напряжений по формулам (1), (2) была составлена программа на ЭВМ "Урал-2". Значения производных в уравнениях (2) определялись по экспериментальным данным путём параболической аппроксимации зависимостей деформаций по толщине удалённого слоя. При такой аппроксимации для определения остаточных напряжений на внутренней или наружной поверхностях трубы достаточно удалить с соответствующей поверхности первые два слоя.

Следует отметить, что последовательное удаление тонких цилиндрических слоёв является наиболее длительной и трудоёмкой операцией для большинства механических методов. Выполнение этой операции на темпете сравнительно небольших размеров не требует длительной загрузки крупногабаритных станков и сокращает время экспериментальных работ.

Измерение деформаций тензодатчиками сопротивления при исследовании

довании остаточных напряжений связано с продолжительными выдержками между моментами окончания очередной операции механической обработки и началом замера, необходимыми для полного остывания и выравнивания температуры в детали. При этом большое внимание уделяется соблюдению условий термокомпенсации. В условиях, когда измеряемые по мере удаления тонких слоев с детали деформации весьма малы, даже незначительные колебания температуры окружающей среды могут привести к существенным ошибкам.

При замере деформаций в темплете указанные трудности удалось в значительной мере устранить с помощью термостатирования. Небольшие размеры темплета позволили (после снятия очередного слоя и выдержки на воздухе в течение 5-10 мин) погружать его в сосуд с трансформаторным маслом, предварительно подсоединив тензодатчики, защищенные слоем эпоксидной смолы, к измерительному прибору. Через 15-20 минут наблюдалась полная стабилизация показаний датчиков.

Во второй главе изложены результаты исследования (на основе предложенной методики) остаточных напряжений в трубах диаметром 500 мм с толщиной стенки 16 мм, изготовленных полунепрерывным способом литья.

Проведенные эксперименты позволили установить особенности распределения остаточных напряжений в этих трубах: в точках наружной и внутренней поверхностей осевые и окружные остаточные напряжения растягивающие, в средней части по толщине стенки — сжимающие.

Сравнение величин остаточных напряжений, найденных по результатам обработки различных темплетов, вырезанных из определенной трубы, обнаружило некоторый разброс значений напряжений. Это может быть объяснено наличием в материале трубы всевозможных литейных дефектов, распределенных случайным образом, случайными ошибками измерений. С целью достоверной количественной оценки величин остаточных напряжений в этих условиях из каждой исследуемой трубы было вырезано и обработано по 16 темплетов с последующей статистической обработкой результатов. Оказалось, что с вероятностью 0,95 величины растягивающих остаточных напряжений в точках внутренней и наружной поверхностей труб, изготовленных при нормальных технологических параметрах литья, лежат в следующих интервалах (в кг/мм^2): на наружной поверхности — осевые напряжения $7,24 \leq \sigma_{\text{нар}} \leq 8,92$;

окружные $3,41 \leq \sigma_{\text{нар.}} \leq 5,83$;
на внутренней поверхности - осевые напряжения $7,08 \leq \sigma_{\text{вн.}} \leq 9,17$;
окружные $3,28 \leq \sigma_{\text{вн.}} \leq 5,66$.

Значения сжимающих остаточных напряжений в средней по толщине части трубы значительно меньше и не превосходят 2 кг/мм^2 .

Уровень растягивающих остаточных напряжений в поверхностных слоях следует считать высоким, поскольку величина этих напряжений достигает 60% от временного сопротивления материала труб (серый чугун) на растяжение. В связи с этим в работе проводилось исследование различных способов уменьшения опасных для прочности труб растягивающих остаточных напряжений.

Известно, что окончательные свойства чугунных отливок - структура, механические характеристики материала, уровень остаточных напряжений - определяются, в основном, условиями затвердевания и охлаждения заливаемого металла, его химическим составом, режимом последующей термообработки. Влияя на эти факторы, можно регулировать те или иные свойства отливок.

Формирование цилиндрической части труб полунепрерывного литья происходит за короткий промежуток времени, когда металл находится в полости между водоохлаждаемыми наружным и внутренним кристаллизаторами, в условиях интенсивного двухстороннего охлаждения. Возможность изменения (в определённых пределах, не приводящих к браку труб) некоторых важнейших параметров процесса литья - скорости извлечения трубы из кристаллизатора, его профиля, химического состава металла позволяет активно воздействовать на условия затвердевания и охлаждения трубы в кристаллизаторе.

Влияние того или иного фактора на величину остаточных напряжений в трубах полунепрерывного литья оценивалось в данной работе путём сравнения напряжений в трубах, изготовленных при различных его значениях (уровнях), в условиях, когда все остальные контролируемые параметры процесса литья поддерживались неизменными. Оценка значимости влияния фактора производилась на основе дисперсионного анализа (был принят 5% уровень значимости).

Исследование влияния скорости извлечения трубы из кристаллизатора, проведённое на трёх трубах, отлитых со скоростями $V=0,6$;

1; 1,4 м/мин. показало, что с увеличением скорости величины осевых и окружных растягивающих напряжений в точках внутренней и

наружной поверхностью существенно уменьшаются. В исследуемом интервале изменения скорости извлечения это уменьшение составило (по средним значениям напряжений):

на наружной поверхности - для осевых напряжений 39% ,
для окружных 29%;
на внутренней поверхности - для осевых напряжений 30%,
для окружных 39%.

Изменение профиля внутреннего кристаллизатора осуществляется в производственных условиях путём конусной расточки его верхней части (на определённой длине l). Используются кристаллизаторы с положительной конусностью (с расширяющейся книзу на длине l верхней частью), с отрицательной конусностью (с сужающейся книзу частью), а также строго цилиндрические кристаллизаторы.

Сравнение величин остаточных напряжений в трёх трубах, изготовленных на кристаллизаторах с различной конусностью ($K = -0,3 \text{ мм/л}$, цилиндрическая расточка, $0,45 \text{ мм/л}$) показало, что изменение конусности от $0,4 \text{ мм/л}$ до $-0,3 \text{ мм/л}$ привело к уменьшению остаточных напряжений в точках внутренней поверхности (осевых на 29%, окружных на 24%). На напряжения в точках наружной поверхности изменение конусности кристаллизатора не оказало значимого влияния.

Из элементов химсостава металла, используемого для отливки труб, в работе изучалось влияние на величины остаточных напряжений концентрации кремния-элемента, резко повышающего активность углерода и являющегося наиболее мощным графитизатором, а также хрома-элемента, сильно тормозящего процесс графитизации.

Исследования показали, что повышение концентрации кремния способствует уменьшению остаточных напряжений. В интервале изменения концентрации кремния от 1,97% до 2,4% растягивающие остаточные напряжения в точках наружной и внутренней поверхностей уменьшились (по средним значениям):

на наружной поверхности - осевые напряжения на 22%,
окрыжные на 19%;
на внутренней поверхности - осевые напряжения на 18%,
окрыжные на 26%.

Изменение концентрации хрома от 0,04 до 0,13% не оказало значимого влияния на остаточные напряжения.

В работе были исследованы и другие, широко распространенные в практике литейного производства способы уменьшения остаточных напряжений в отливках — длительная выдержка отливок при нормальной температуре (естественное старение), а также низкотемпературный отжиг.

Проведенные в течение полугода измерения остаточных напряжений в трубах полунепрерывного литья показали, что длительная выдержка готовых труб при нормальной температуре не даёт заметного снижения остаточных напряжений.

Сравнения величин остаточных напряжений в обычных трубах и трубах, подвергнутых низкотемпературному отжигу (выдержка в течение 20–30 минут при температуре 620–640°C) показало, что такая термообработка малоэффективна для снятия остаточных напряжений. Характер распределения остаточных напряжений в трубах прошедших термообработку не изменился, величины растягивающих остаточных напряжений на внутренней и наружной поверхностях уменьшились незначительно.

В третьей и четвёртой главах диссертации приведены результаты исследования факторов, играющих важную роль в механизме образования остаточных напряжений в отливках.

В третьей главе описывается методика и результаты экспериментального исследования температурного поля в трубах диаметром 500 мм в процессе их изготовления полунепрерывным способом литья.

Термометрирование проводилось хромель-алюмелевыми термопарами. Термоэлектроды (диаметром 0,3 мм) изолировались кремнеземистой нитью НК-II с последующей пропиткой термостойким лаком ФГ-9, после чего каждая термопара изолировалась тонким асбестовым шнуром. Сигналы термопар регистрировались осциллографом Н-700. Пять термопар, соединённых через определённые интервалы в плоский блок, погружались в жидкий металл, находящийся в полости между наружными и внутренними кристаллизаторами. Оставаясь в теле отливки в процессе затвердевания металла, термопары про-

двигались в кристаллизаторе по мере формирования трубы, затем вместе с трубой выходили из него. В результате термометрирования получено распределение температур по толщине стенки трубы в период её затвердевания в кристаллизаторе и последующего охлаждения на воздухе. Характерной особенностью первого этапа является превышение температур средней по толщине части трубы по сравнению с поверхностными слоями, соприкасающимися с водоохлаждаемыми поверхностями кристаллизатора. По данным измерений в начале заливки этот перепад составляет 200°C , а к моменту выхода трубы из кристаллизатора уменьшается до 80°C . После выхода из кристаллизатора (примерно на 40-й секунде после начала затвердевания, при температуре наружной поверхности трубы 980°C) характер температурного поля изменяется и на втором этапе, при охлаждении трубы на воздухе, температура внутренней поверхности превышает температуру наружной. Сразу после выхода из кристаллизатора это превышение составило 80°C и уменьшалось в дальнейшем. При этом распределение температур по толщине стенки приближается по мере охлаждения к линейному.

В четвертой главе изложены результаты исследования структуры и физико-механических характеристик материала и их изменения по толщине стенки труб. Здесь же рассматривается механизм образования остаточных напряжений.

Выполненные металлографические исследования показали, что структура серого чугуна труб полунепрерывного литья существенно неоднородна по толщине стенки. Графитные включения у наружной и внутренней поверхностей трубы имеют междентритное точечное строение, по мере приближения к срединному слою появляются розеточные включения графита, в середине графит имеет пластинчатую форму.

Металлическая основа серого чугуна, состоящая из феррита и тонкопластинчатого перлита также существенно изменяется по толщине стенки. Вблизи наружной и внутренней поверхностей трубы она характеризуется преобладанием феррита (площадь, занятая перлитом по отношению к общей площади, наблюдаемой под микроскопом составляет лишь 5-10%). По мере приближения к среднему по толщине слою количество перлита возрастает и в середине стенки достигает 90-98%.

Значительная структурная неоднородность материала по толщине стенки предопределяет неоднородность физико-механических характеристик. В работе были определены законы распределения по толщине стенки модуля упругости и предела прочности материала при растяжении. Проводились испытания плоских образцов толщиной 3 мм (ГОСТ 1497-61, тип Ш) вырезанных из пяти различных слоёв — двух непосредственно прилегающих к внутренней и наружной поверхностям, двух промежуточных, удалённых на 5 мм от поверхностей, и среднего по толщине. Испытания проводились на разрывной машине Р-5 вплоть до разрушения. Замер деформаций осуществлялся двумя рычажными тензомерами, установленными на противоположных гранях рабочей части образца. Результаты эксперимента позволили установить, что как модуль упругости, так и предел прочности существенно изменяются по толщине стенки. Наибольших значений эти характеристики достигают на внутренней и наружной поверхностях. Здесь, с вероятностью 0,95 модуль упругости лежит в интервале $0,9 \cdot 10^4$ — $1,2 \cdot 10^4$ кг/мм², предел прочности — 14 ± 18 кг/мм². По мере удаления от поверхностей эти характеристики уменьшаются. В среднем по толщине части трубы величина модуля упругости на 40%, а предела прочности на 15% меньше, чем в поверхностных слоях (по средним значениям для каждого слоя).

Для установления закона распределения коэффициента линейного расширения материала при различных температурах по толщине стенки на дифференциальном оптическом dilatометре Шевнера типа ДР были выполнены dilatометрические испытания образцов, вырезанных также из пяти различных по толщине слоёв. Было обнаружено, что в интервале от 20 до 600°C коэффициент линейного расширения изменяется по толщине стенки. В слоях, прилегающих к наружной и внутренней поверхностям трубы, величина этого коэффициента на 4-10% больше, чем в срединном слое. Следует отметить, что характер изменения модуля упругости, предела прочности и коэффициента линейного расширения близок к симметричному относительно срединного слоя.

На основе полученных экспериментальных данных об условиях охлаждения и структурной неоднородности материала проанализирован механизм образования остаточных напряжений в трубах полунепрерывного литья. С помощью термоупругого расчёта показана значитель-

ная роль структурной неоднородности материала трубы по толщине стенки в формировании остаточных напряжений. Рассматривалась длинная тонкостенная цилиндрическая оболочка под воздействием температурного поля, изменяющегося по радиусу и во времени - $T(z, t)$. Модуль упругости и коэффициент линейного расширения материала переменны по толщине и зависят от температуры - $E(z, T)$, $\alpha(z, T)$.

Термоупругие напряжения в любом слое такой оболочки определяются по формулам

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \frac{E}{1-\mu} \left[\varepsilon_T - \frac{z_1 \int_{z_1}^{z_2} E \varepsilon_T z dz}{\int_{z_1}^{z_2} E z dz} \right], \\ \sigma_\theta &= \frac{E}{1-\mu} \left[\varepsilon_T - \frac{z_1 \int_{z_1}^{z_2} E \varepsilon_T dz}{\int_{z_1}^{z_2} E dz} \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $\varepsilon_T = \int_T^{\tau_2} \alpha dT$ - температурная деформация.

Выражения (3) были использованы для определения температурных напряжений в трубах полунепрерывного литья после низкотемпературного отжига. Предполагалось, что в результате длительной выдержки при 650°C исходные остаточные напряжения в трубе полностью релаксируют. При последующем медленном равномерном охлаждении в однородной отливке напряжения вновь бы не возникли. В исследуемых трубах полунепрерывного литья, физико-механические свойства которых существенно неоднородны по толщине стенки, к моменту охлаждения от 650°C до нормальной температуры остаточные напряжения образуются вновь. Расчёты, выполненные по формулам (3) с учётом реального распределения по толщине стенки труб коэффициента линейного расширения и модуля упругости, показали, что величина вновь возникающих остаточных напряжений весьма существенна, закон их распределения полностью совпадает с найденным экспериментально. Сравнение величин напряжений, полученных расчётом и найденных экспериментально в трубах, прошедших низкотемпературный отжиг, дало удовлетворительное совпадение.

Выполненные расчётно-теоретические исследования позволяют утверждать, что основной причиной малой эффективности низкотемпературного отжига труб полунепрерывного литья для снятия остаточных напряжений является неоднородность распределения коэффициента линейного расширения материала по толщине стенки.

Пятая глава посвящена определению - на основе теории планирования экспериментов - оптимального (по уровню остаточных напряжений) режима литья труб диаметром 500 мм.

Обнаруженная неэффективность низкотемпературного отжига и длительной выдержки готовых труб при нормальной температуре для снятия остаточных напряжений и, в то же время, заметное влияние на величину последних некоторых технологических параметров процесса литья (глава вторая), позволяют предполагать, что основным путём уменьшения опасных для прочности чугунных труб растягивающих остаточных напряжений является установление такого сочетания технологических параметров, при котором величины этих напряжений будут минимальными. Подобного рода экстремальные задачи по отысканию оптимальных условий протекания малоизученных многофакторных процессов эффективно решаются методами планирования экспериментов.

В данной работе методом полного факторного эксперимента была найдена зависимость растягивающих остаточных напряжений, достигающих максимумов в точках наружной и внутренней поверхностей труб, от совместного влияния трёх наиболее важных технологических параметров процесса литья: скорости извлечения трубы из кристаллизатора (V), конусности внутреннего кристаллизатора (K) и концентрации кремния в составе заливаемого металла (Si), изменяющихся в определённой области варьирования. Границы этой области, установленные из условия, чтобы изменение факторов в её пределах не нарушало устойчивости процесса литья при изготовлении труб на промышленной установке и не приводило к браку труб по каким-либо показателям (качество поверхности, искажение формы и др.), были следующими:

$$\left. \begin{aligned} 1,36 \text{ м/мин} &\geq V \geq 0,6 \text{ м/мин}, \\ 0,5 \text{ мм/л} &\geq K \geq -0,4 \text{ мм/л}, \\ 2,5\% &\geq Si \geq 1,94\% . \end{aligned} \right\} (4)$$

В трубах, отлитых по восьми различным режимам литья, предусмотренным заранее составленным планом, проводилось экспериментальное исследование остаточных напряжений по методике, описанной в первой главе.

Математические модели в виде уравнений регрессии, адекватно описывающих изучаемый процесс, полученные после соответствующего дисперсионного анализа экспериментальных данных, имеет следующий вид (статистически незначимые коэффициенты регрессии в уравнениях опущены):

$$Y_1 = 9,15 - 2,18x_1 + 0,21x_2 - 0,86x_3 + 0,27x_1x_3 ; \quad (5)$$

$$Y_2 = 5,83 - 0,93x_1 + 0,27x_2 - 0,58x_3 - 0,19x_1x_3 ; \quad (6)$$

$$Y_3 = 8,87 - 1,64x_1 + 0,40x_2 - 0,61x_3 + 0,16x_1x_3 + 0,28x_1x_3 + 0,19x_2x_3 ; \quad (7)$$

$$Y_4 = 6,17 - 0,98x_1 + 0,30x_2 - 0,47x_3 + 0,16x_1x_2 + 0,21x_1x_3 + 0,17x_2x_3 . \quad (8)$$

Здесь Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 - растягивающие остаточные напряжения в точках наружной (Y_1 - осевые, Y_2 - окружные) и внутренней (Y_3 - осевые, Y_4 - окружные) поверхностей трубы;

x_1 - скорость извлечения трубы из кристаллизатора;

x_2 - конусность внутреннего кристаллизатора;

x_3 - концентрация кремния.

Полученные уравнения позволяют предсказывать величину растягивающих остаточных напряжений в любой точке факторного пространства

ва из области (4), оценить влияние отдельных факторов и их взаимодействий, найти пути уменьшения этих напряжений.

Анализ уравнений (5-8) показал, что уменьшения осевых и окружных растягивающих остаточных напряжений на обеих поверхностях трубы способствует увеличение скорости извлечения трубы из кристаллизатора, применение внутренних кристаллизаторов с отрицательной конусностью, увеличение концентрации кремния в составе заливаемого металла. Сравнение численных значений коэффициентов регрессии в каждом из уравнений (5-8) позволило установить, что наибольшее влияние на остаточные напряжения в исследуемой области оказывает скорость извлечения трубы. Немного меньше зависят эти напряжения от концентрации кремния и ещё меньше от конусности внутреннего кристаллизатора.

Геометрическая интерпретация полученных моделей показана на рис. I. В исследуемой области варьирования (4), ограниченной граниями куба, построены поверхности равного выхода для каждого из напряжений U_1, U_2, U_3, U_4 .

На этих рисунках легко заметить общую для всех исследуемых напряжений тенденцию - они существенно (в 1,6-2 раза) уменьшаются при переходе от режима литья, характеризуемого пониженными значениями скорости извлечения и концентрации кремния при положительной конусности внутреннего кристаллизатора ($V = 0,6$ м/мин, $Si = 1,94\%$, $K = 0,5$ мм/г) к режиму литья с параметрами $V = 1,86$ м/мин, $Si = 2,5\%$, $K = -0,4$ мм/г. Последний режим является оптимальным в исследуемой области варьирования. Очевидно, дальнейшее увеличение скорости извлечения, концентрации кремния и применение внутренних кристаллизаторов с ещё большей отрицательной конусностью привело бы к более существенному снижению растягивающих остаточных напряжений. Однако в производственных условиях выход за пределы исследуемой области ведёт к браку труб по другим параметрам.

Среди других параметров, определяющих помимо остаточных напряжений качество труб полунепрерывного литья, наиболее важными являются механические характеристики материала. В данной работе наряду с главными оптимизируемыми параметрами - растягивающими остаточными напряжениями, контролировалось изменение в области (4) предела прочности и модуля упругости материала при растяже-

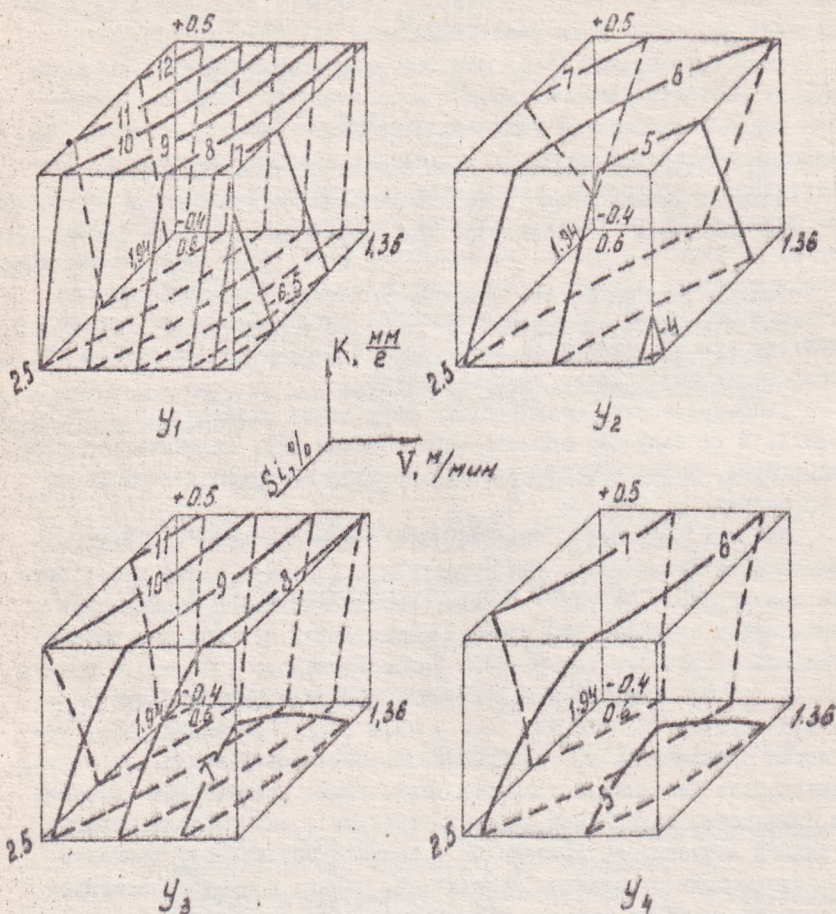


Рис. I. Поверхности равного выхода для осевых и окружных растягивающих остаточных напряжений в точках наружной и внутренней поверхностей труб

нии путём испытаний на растяжение плоских образцов, вырезанных из различных по толщине стенки слоёв тех же труб, в которых производилось определение остаточных напряжений. Дисперсионный анализ полученных результатов показал, что изменение скорости извлечения трубы, конусности внутреннего кристаллизатора и концентрации кремния в пределах исследуемой области (4) не оказывает значимого (с пятипроцентным уровнем значимости) влияния на эти механические характеристики. Таким образом, изготовление труб по режиму близкому к оптимальному, обеспечивая существенное снижение опасных для прочности труб растягивающих остаточных напряжений, не приводит к снижению механических свойств материала.

В Ы В О Д Ы

1. Разработана методика определения остаточных напряжений в трубах большого диаметра, имеющих вследствие особенностей извлечения не строго цилиндрическую форму (наличие овальности, эллипсности) и неоднородные механические свойства по толщине стенок. В соответствии с предложенной методикой из трубы вырезается прямоугольный в плане темплет, с которого в дальнейшем последовательно снимаются тонкие концентрические слои, имеющие форму исходного цилиндра. При выполнении этих операций тензодатчиками сопротивления измеряются продольные и окружные деформации внутренней или наружной поверхностей в центре темплетов. Расчётные зависимости получены с учётом переменности модуля упругости по толщине стенки труб.

2. С использованием этой методики выполнено экспериментальное исследование остаточных напряжений в трубах полунепрерывного литья диаметром 500 мм с толщиной стенки 16 мм. Установлен закон распределения остаточных напряжений по толщине стенки: в точках наружной и внутренней поверхностей осевые и окружные остаточные напряжения оказываются растягивающими, причём их величина достигает 60% от временного сопротивления при растяжении материала трубы (серый чугун). В средней по толщине части труб напряжения сжимающие, небольшие по величине - 1-2 кг/мм².

3. Исследовано влияние на величину остаточных напряжений некоторых технологических параметров процесса литья, в значительной мере определяющих условия формирования труб в кристаллизаторе. Обнаружена существенная зависимость опасных для прочности чугунных труб растягивающих остаточных напряжений от скорости извлечения труб из кристаллизатора, концентрации кремния в составе заливаемого металла, а также от профиля внутреннего кристаллизатора. Влияние концентрации хрома на величину напряжений окажется незначимым (с пятипроцентным уровнем значимости).

4. Проведена оценка эффективности длительной выдержки готового изделия при нормальной температуре (естественное старение) для снятия остаточных напряжений. Выполнявшиеся в течение полугода измерения показали, что остаточные напряжения в трубах полунепрерывного литья быстро стабилизируются и в дальнейшем фактор времени практически не оказывает влияния на величину напряжений.

5. Исследовано влияние на величину остаточных напряжений низкотемпературного отжига — наиболее распространенного способа уменьшения остаточных напряжений в отливках. Показано, что для уменьшения остаточных напряжений в трубах полунепрерывного литья низкотемпературный отжиг малоэффективен. Характер распределения остаточных напряжений в трубах, прошедших термообработку, не изменился, величины растягивающих напряжений в точках внутренней и наружной поверхностей уменьшились незначительно.

6. Проведено термометрирование трубы в процессе её изготовления на промышленной установке полунепрерывной отливки труб. Получено распределение температур по толщине стенки трубы в период её формирования в кристаллизаторе и при дальнейшем охлаждении на воздухе.

7. Металлографические исследования материала труб полунепрерывного литья выявили существенную неоднородность строения металлической основы и графитных включений по толщине стенки, что предопределяет различие физико-механических характеристик материала.

8. Дилатометрические испытания образцов, вырезанных из различных по толщине стенки слоев показали, что коэффициент линейного расширения в слоях, прилегающих к наружной и внутренней

поверхностям труб при различных температурах на 4-10% больше, чем в средней по толщине части. Характер изменения этого коэффициента по толщине стенки близок к симметричному относительно срединного слоя.

9. Проведены механические испытания плоских образцов, вырезанных из различных по толщине стенки слоёв трубы. Установлено, что модуль упругости и предел прочности при растяжении существенно изменяются по толщине стенки. Наибольших значений эти характеристики достигают в точках внутренней и наружной поверхностей, уменьшаясь по мере приближения к срединному слою (на 40% модуль упругости и на 15% временное сопротивление). Характер распределения этих характеристик по толщине стенки трубы близок к симметричному относительно срединного слоя. Обнаруженную неоднородность механических характеристик по толщине стенки необходимо учитывать при оценке прочности труб.

10. Проанализирован механизм образования остаточных напряжений в трубах полунепрерывного литья. Показана роль структурной неоднородности как одной из основных причин возникновения значительных напряжений в этих трубах, и в связи с этим, дано объяснение малой эффективности низкотемпературного отжига для снятия остаточных напряжений.

11. С использованием теории планирования экспериментов определены математические модели зависимостей опасных для прочности растягивающих осевых и окружных остаточных напряжений в точках внутренней и наружной поверхностей трубы от скорости её извлечения из кристаллизатора, концентрации кремния в составе заливаемого металла и профиля внутреннего кристаллизатора. Полученные модели позволяют при известных значениях варьируемых параметров заранее предсказать величины этих напряжений в исследуемой области варьирования.

Определён оптимальный (по уровню остаточных напряжений) режим литья в этой области. Показано, что при литье труб по режиму, близкому к оптимальному, величина остаточных напряжений может быть существенно снижена, при этом механические свойства остаются на прежнем уровне.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. ГОХФЕЛЬД Д.А., ВАШУК В.А., ПЛАГОВ И.М., ПАРШУКОВА Л.И. Определение остаточных напряжений в трубах полунепрерывной отливки. "Литейное производство", 1971, № 5.

2. ВАШУК В.А. Методика определения остаточных напряжений в трубах полунепрерывной отливки. Сб. "Вопросы прочности и динамики конструкций", Труды ЧПИ, Челябинск, 1971.

3. ВАШУК В.А., РАДИН Л.Ф. Температурные поля в трубах диаметром 500 мм при их изготовлении полунепрерывным способом литья. Сб. "Вопросы прочности и динамики конструкций", Труды ЧПИ, 92, Челябинск, 1971.

4. ВАШУК В.А. Исследование и оптимизация остаточных напряжений в трубах полунепрерывного литья. "Известия вузов. Чёрная металлургия", 1972, № 5.

5. ВАШУК В.А. Влияние различных технологических факторов и термической обработки на величину остаточных напряжений в трубах полунепрерывной отливки. В сб. "Материалы XIII научно-технической конференции ЧПИ", Челябинск, 1970.

Результаты работы докладывались:

на Всесоюзной научно-технической конференции "Остаточные напряжения и несущая способность деталей машин", Харьков, 1969;

на Республиканской межвузовской научно-технической конференции "Теории формирования технологических напряжений и их инженерное приложение", Запорожье, 1969;

на Республиканской научно-технической конференции молодых учёных и инженеров-трубников, Днепропетровск, 1970.

на XXII-XXV научно-технических конференциях Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола, 1969-1972.

ФБ02358. 26/IX - 72 г. Сдано в печать 27/IX - 72 г. Формат бу-
маги 60x90 1/16. Объем 1,5 п.л. Отпечатано на ротапринте ЧПИ.
Тираж 120 экз. Заказ № 223/776.