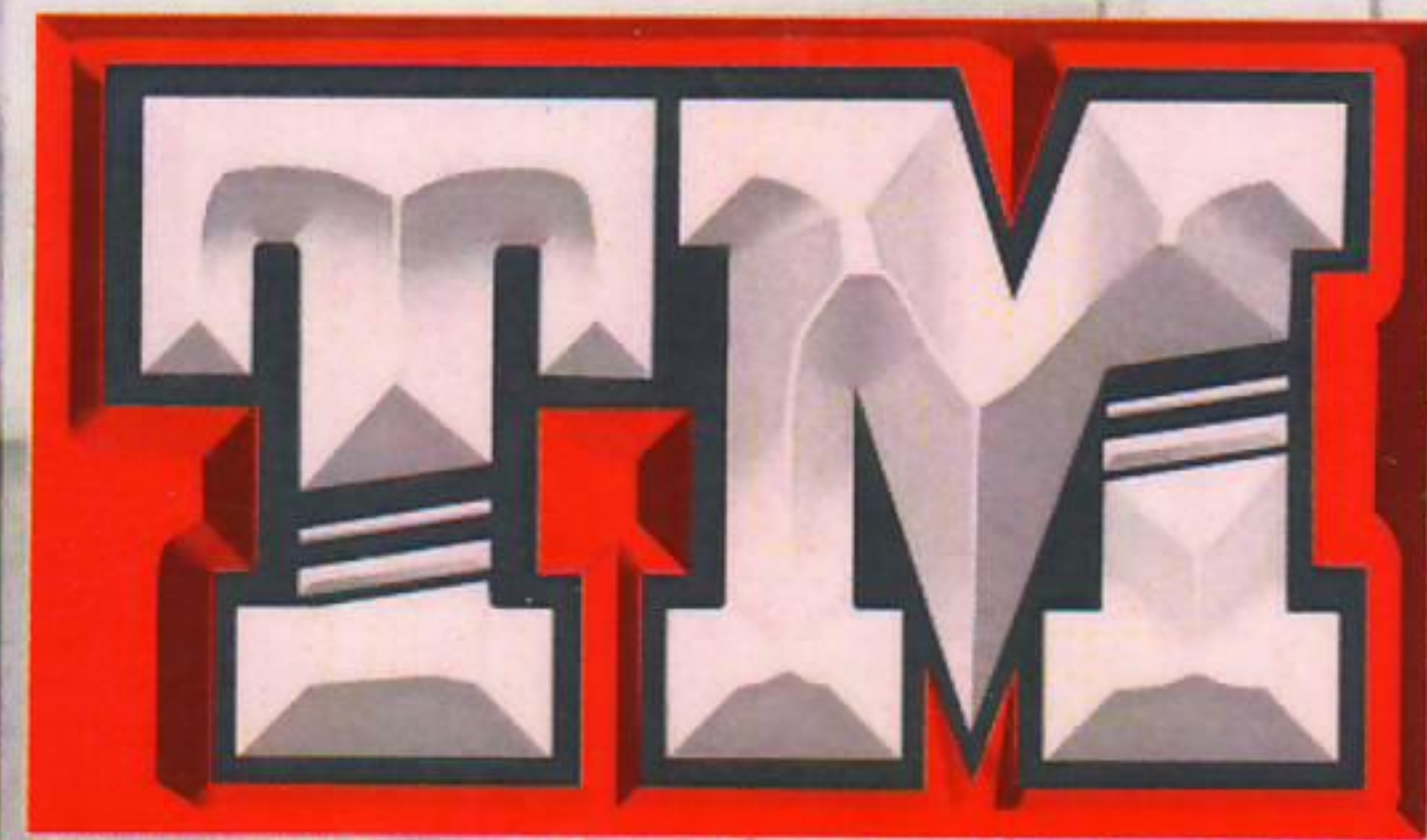




ISSN 0131-1336

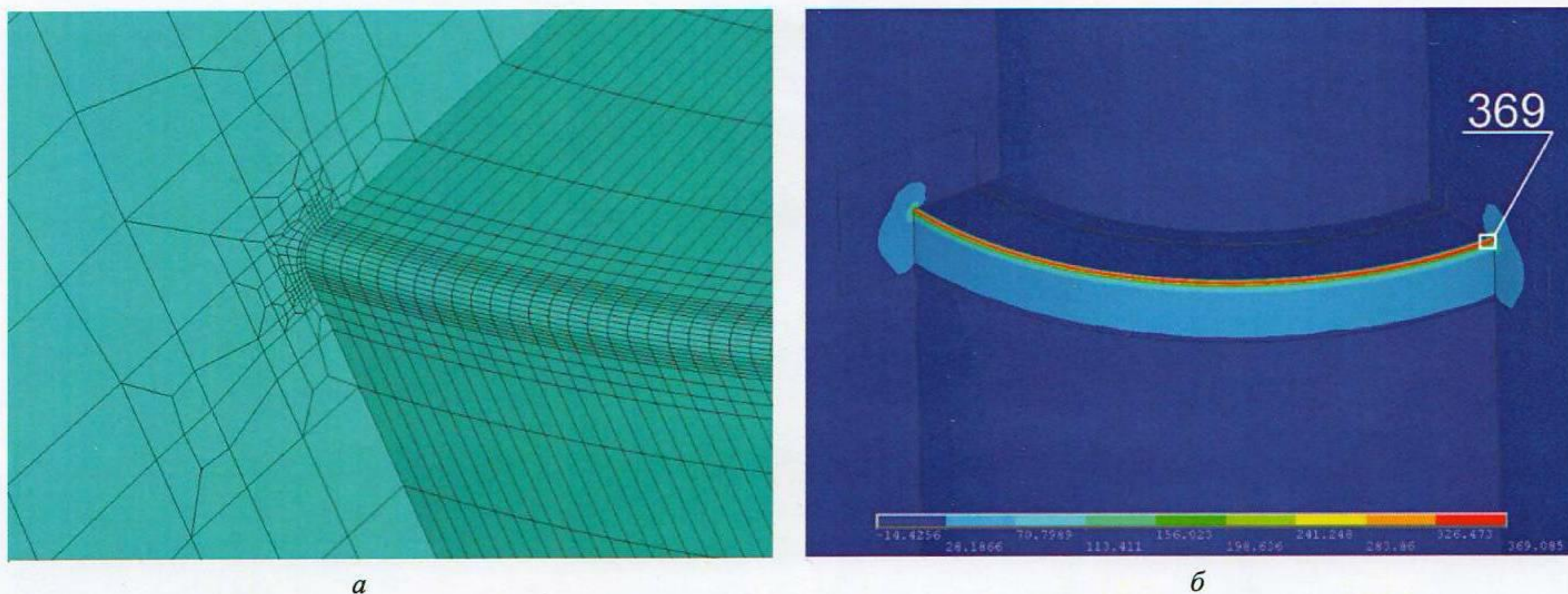
8/2012

ТЯЖЕЛОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

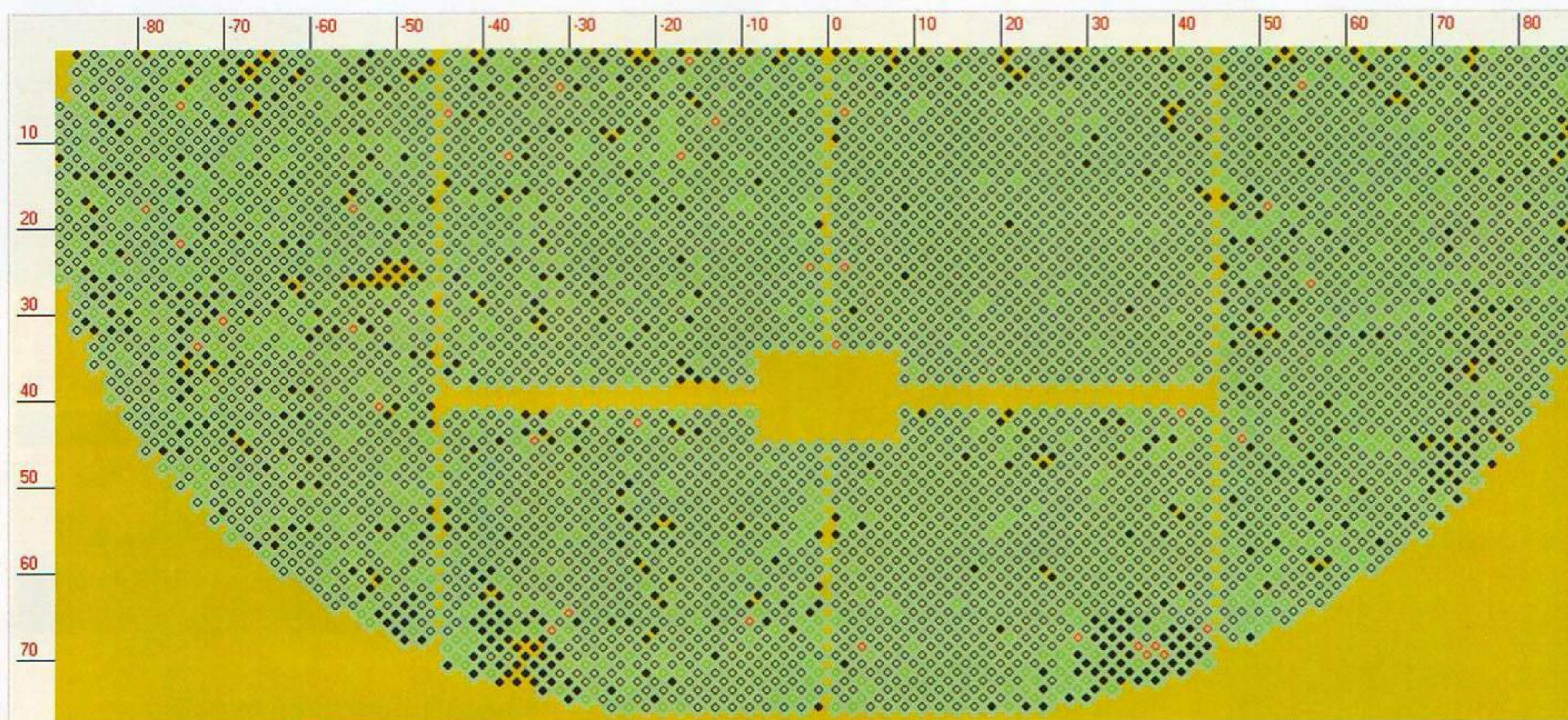
ТЕПЛОЗАЩИТА – НОВЫЕ СПОСОБЫ
И ТЕХНОЛОГИИ

>> С.12

Иллюстрации



Илл. 1. Конечно-элементная сетка и напряженное состояние (σ_1 , МПа) в зоне галтели контактной площадки под нажимную гайку: а) конечно-элементная сетка; б) напряженное состояние



Илл. 2. Картограмма ПГВ-440 в ИАС «Парогенераторы АЭС»: зеленым цветом обозначены трубы с допустимыми дефектами, в данном случае глубина которых менее 75%; красным цветом — трубы с недопустимыми дефектами, глубина которых более 75%; черным цветом — заглушенные трубы

УДК 669

Ю. С. Семичев;

И. А. Сурков, канд. техн. наук

(ООО «Надежность ТМ», г. Москва)

Предупреждение аварий тяжелых металлургических машин, вызванных разрушением их базовых деталей

Тяжелые машины, работающие в металлургической промышленности, такие как мощные гидравлические прессы и крупные прокатные станы, находятся в эксплуатации 40–50 и более лет. С увеличением сроков эксплуатации машины устаревают морально и физически и перестают соответствовать современным технологическим запросам и требованиям по предупреждению аварийных ситуаций, связанных с разрушением оборудования. Но обновление всего парка тяжелых машин в короткие сроки путем полной их замены является невыполнимой задачей.

В то же время современный технологический уровень тяжелых машин может быть обеспечен модернизацией систем привода, управления и механизации (20% массы и стоимости оборудования) и сохранением для дальнейшей эксплуатации базовых деталей (колонн и поперечин гидравлических прессов, станин клетей прокатных станов), составляющих до 80% массы и стоимости оборудования. Поэтому выявление и устранение причин физического старения и обеспечение дальнейшей безотказной работы базовых деталей составляют основу инновационного проекта обновления тяжелых машин.

Процесс физического старения определяется числом разрушений базовых деталей и экономическими затратами на ликвидацию последствий этих разрушений. Анализ разрушений базовых деталей тяжелых машин показал, что эти разрушения не связаны со старением всего объема материала детали в процессе длительной эксплуатации. Причины разрушения в виде локальных зон, конструктивных и технологических концентраторов напряжений с самого начала эксплуатации были предусмотрены заводом-изготовителем на стадиях проектирования, изготовления и монтажа. Своевременное выявление и устранение этих причин позволяет предотвратить значительный экономический ущерб, а в ряде случаев и катастрофические последствия, вызванные разрушением базовых деталей.

Покажем на ряде примеров причины и последствия разрушений базовых деталей и основные направления деятельности по предупреждению таких разрушений.

Гидравлический пресс силой 500 МН установлен на заводе Алкоа в г. Кливленд, США (рис. 1). Высота пресса 27 м, из них 11 м ниже уровня пола; общая масса пресса 8000 т. Пресс начал работать в 1955 г. и до настоящего времени остается самым мощным в мире ковочным прессом. Но несмотря на значительное время нахождения в эксплуатации, пресс морально не устарел, его продукция востребована крупнейшими авиационными и оборонными предприятиями.

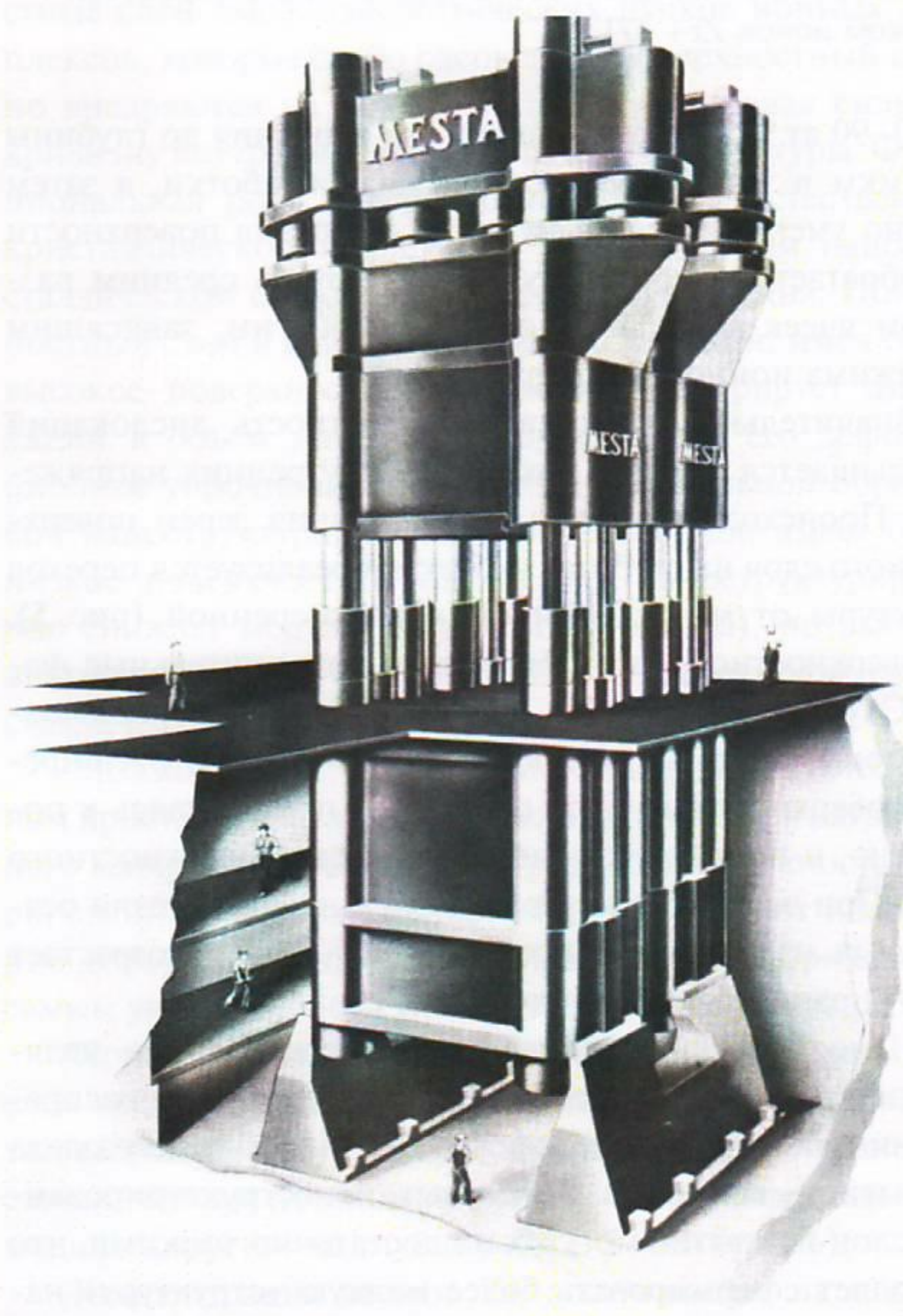


Рис. 1. Ковочный пресс силой 500 МН

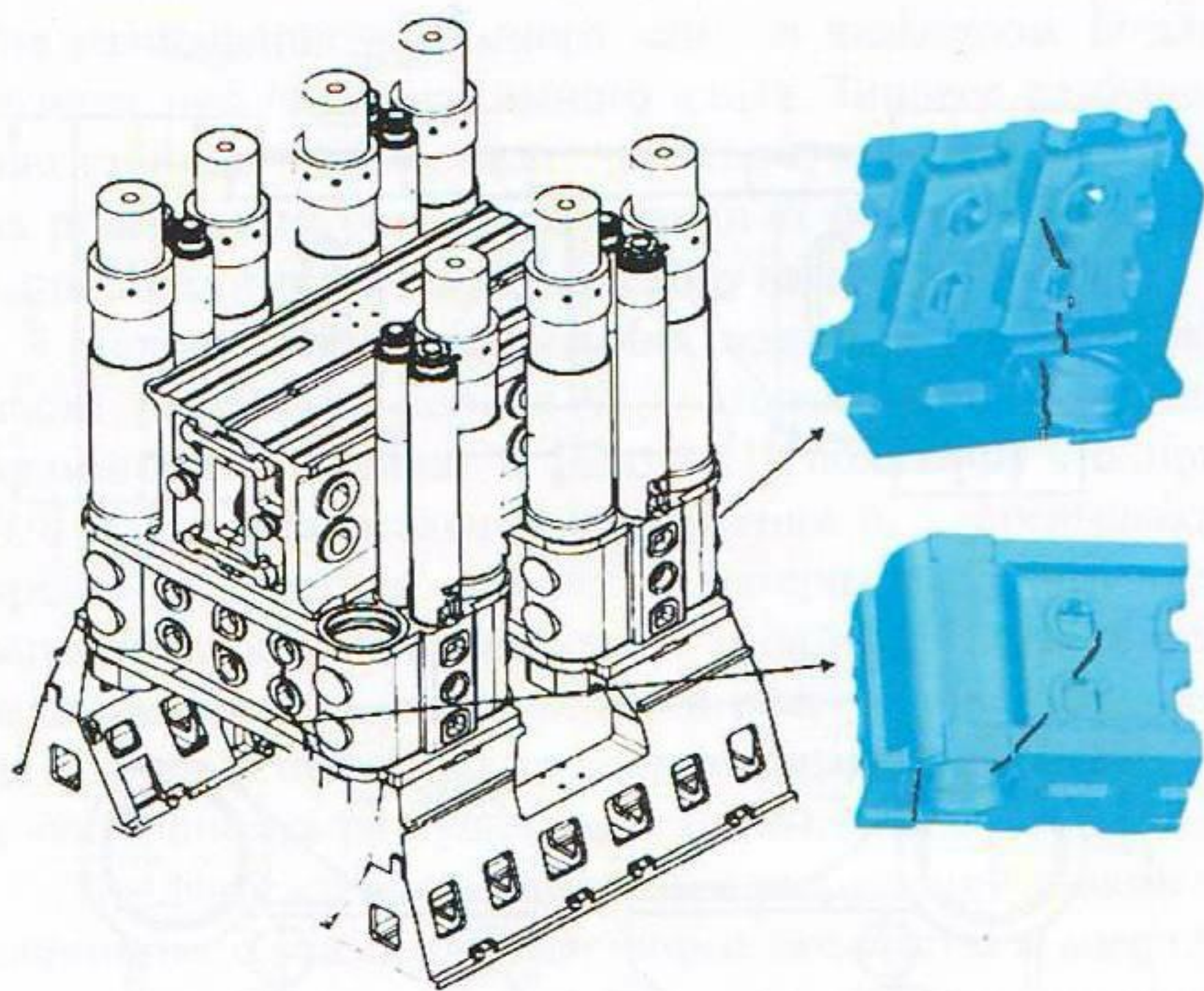


Рис. 2. Схема разрушения поперечных балок основания пресса силой 500 МН

Авария 8 августа 2008 г. была вызвана внезапным разрушением нижних поперечных балок основания пресса (рис. 2).

Первоначальные усталостные трещины возникли в зонах конструктивных концентраторов напряжений на контурах отверстий в стенках балок. Постепенный рост усталостных трещин не оказывал влияния на параметры технологического процесса и оставался незамеченным. После развития усталостных трещин до критических размеров при штатном технологическом нагружении пресса произошло мгновенное хрупкое разрушение нижних поперечных балок. За счет динамических нагрузок, возникших при разрушении поперечных балок, оказались поврежденными фундаментные балки и главные колонны.

Восстановление пресса потребовало изготовления новых фундаментных балок, поперечных балок и колонн. Простой пресса от момента аварии до запуска в эксплуатацию (декабрь 2011 г.) составил 3 года 5 месяцев.

После аварии специалистами завода был проведен расчет поперечных балок пресса методом конечных элементов. Результаты расчета показали, что при номинальной силе пресса $P_{\text{ном}} = 500$ МН максимальные напряжения на контурах технологических отверстий в поперечных балках достигали $\sigma_{\text{max}} = 170\text{--}210$ МПа; в остальном объеме материала напряжения не превышали 70 МПа.

Поперечные балки выполнены из литой стали с пределом усталостной прочности при пульсационном цикле растяжения $\sigma_0 = 150$ МПа, тогда для локальной зоны контура технологического отверстия запас усталостной прочности

$$n = \frac{\sigma_0}{\sigma_{\text{max}}} = \frac{150}{(170 \dots 210)} = 0,71 \dots 0,88 < 1.$$

Для остального объема материала поперечной балки запас усталостной прочности

$$n = \frac{\sigma_0}{\sigma} = \frac{150}{70} \geq 2,2.$$

При запасе усталостной прочности $n < 1$ возникновение и развитие усталостных трещин становится закономерным; при $n \geq 2,2$ материал работает без ограничения времени эксплуатации.

Таким образом, для предупреждения разрушения поперечных балок было необходимо:

- на момент начала эксплуатации иметь паспорт надежности базовых деталей с оценкой запасов усталостной прочности;
- ввести в инструкцию по эксплуатации работы по плановой экспертизе базовых деталей с установлением фактического состояния зон концентрации напряжений;
- своевременно устранить на месте без демонтажа-монтажа пресса конструктивные концентраторы с запасом усталостной прочности $n < 1$.

Представленный выше пример и результаты анализа большого числа разрушений показывают, что базовые детали во многих случаях содержат конструктивные концентраторы, напряжения в которых превышают пределы прочности материала. При дальнейшей эксплуатации развитие трещин в этих зонах приведет к внезапному разрушению базовых деталей с возможными катастрофическими последствиями. Для своевременной разработки и внедрения технических решений, исключающих возможность возникновения аварийных ситуаций, полностью отработаны теоретические и экспериментальные методы экспертизы состояния действующих и восстановления разрушенных базовых деталей на месте без разборки-сборки металлургической машины. Возможность выполнения крупномасштабных сварочных работ на месте покажем далее на примере восстановления на месте полностью разрушенной подвижной поперечины.

Ковочный пресс силой 32 МН находится в эксплуатации с 1970 г. В июле 2008 г. в подвижной поперечине пресса были обнаружены трещины. На обеих внешних стенках поперечины трещины проходили в диагональном направлении от середины верхней плиты до пазов крепления штампового набора в нижней плите (рис. 3). Стрела клиновой выработки в центре нижней плиты достигала 10 мм, что явилось одной из причин возникновения весьма высоких напряжений, которые привели к образованию трещин.

Восстановление поперечины сваркой проводилось на месте без демонтажа пресса. Разделка трещин под сварку показана на рис. 4. Разработанная технология сварки включала в себя специальные конструктивно-технологические решения, позволяющие сохранить геометрию поперечины и взаимное расположение колонных стаканов. После сварки переносным фрезерным станком были проведены планировка контактных поверхностей поперечины и восстановление пазов для крепления штампового набора.

Ремонт поперечины, включающий в себя подготовительные работы, разделку трещин, сварку и механическую обработку, был проведен в течение 22 суток. Сразу

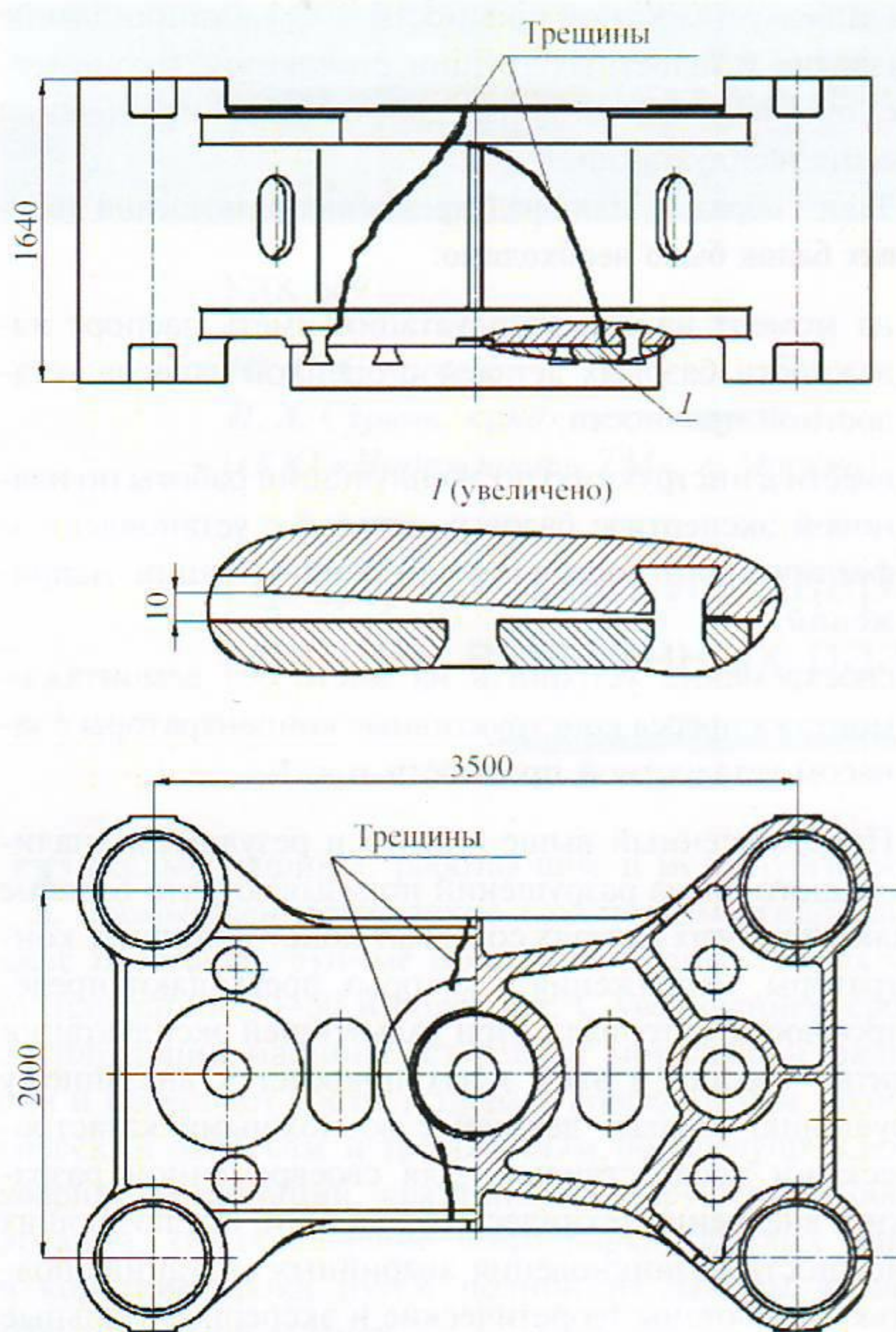


Рис. 3. Расположение трещин в подвижной поперечине ковочного пресса силой 32 МН и формоизменение контактной поверхности поперечины

после окончания ремонта пресс был запущен в эксплуатацию.

Столь короткий срок восстановления на месте полностью разрушенной поперечины мощного гидравлического пресса не имеет precedентов в мировой практике.

В крупных прокатных станах наиболее металлоемкой и трудоемкой по условиям изготовления, транспортировки и монтажа является станина клетки. Так, в чистом виде станина клетки стана 2800 имеет массу 115 т, станина клетки «кварто» стана 5000 имеет массу 330 т. В работе Б. А. Морозова [1] отмечается, что именно прочность станины лимитирует производительность прокатного стана. Это связано с тем, что валки и другие детали клетки периодически заменяются, для их изготовления могут использоваться более прочные материалы, а станина должна сохранять свою работоспособность в течение всего времени эксплуатации прокатного стана.

В то же время практика эксплуатации показывает, что длительные простои линий производства проката, значительные расходы на ремонт и запасные части связаны именно с разрушением станин клетей прокатных станов. Во многих случаях тяжесть последствий аварийной ситуации усугубляется внезапностью произошедшего разрушения. «Внезапность» объясняется тем, что

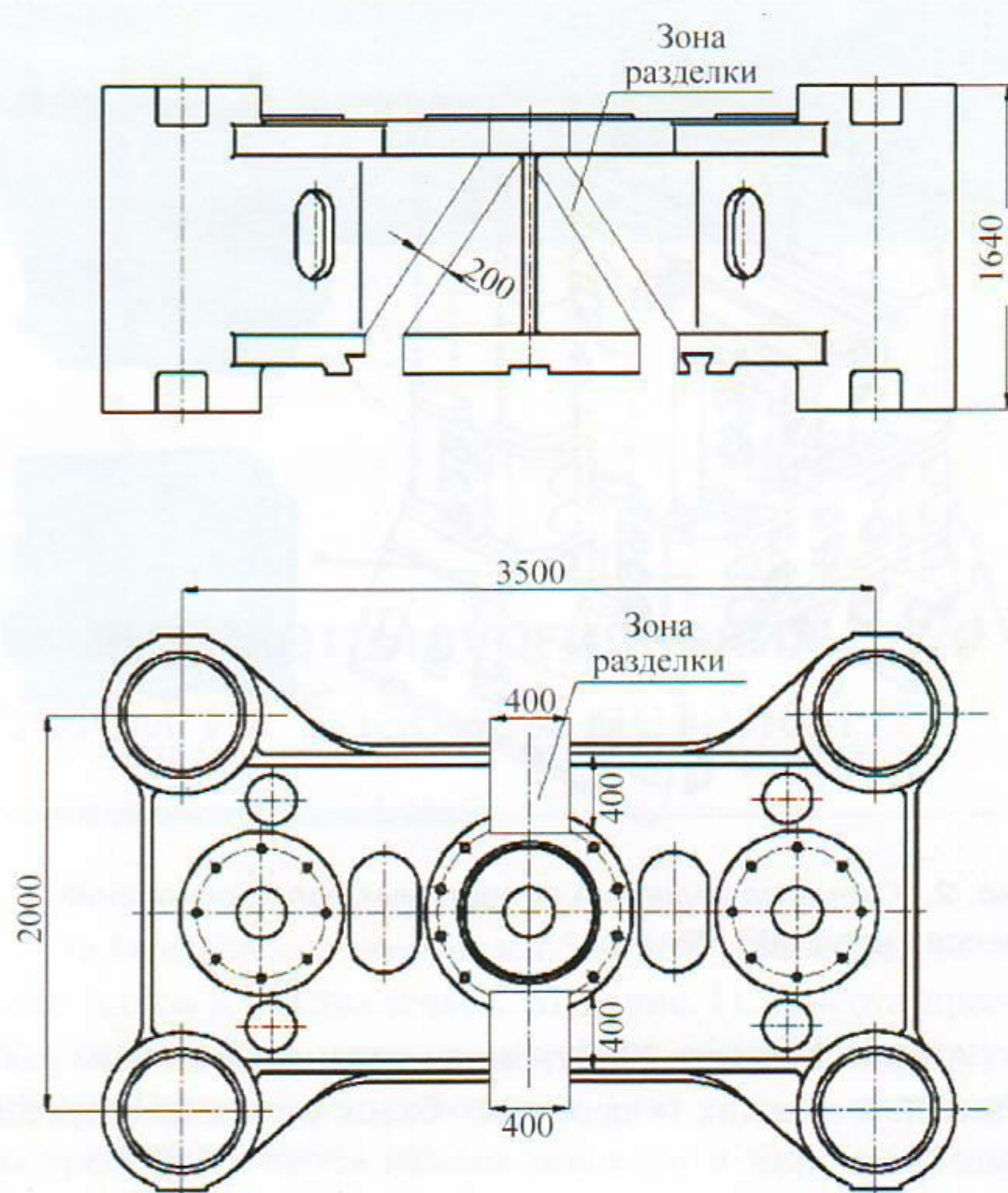


Рис. 4. Разделка под сварку боковых стенок, верхней и нижней плит подвижной поперечины ковочного пресса силой 32 МН

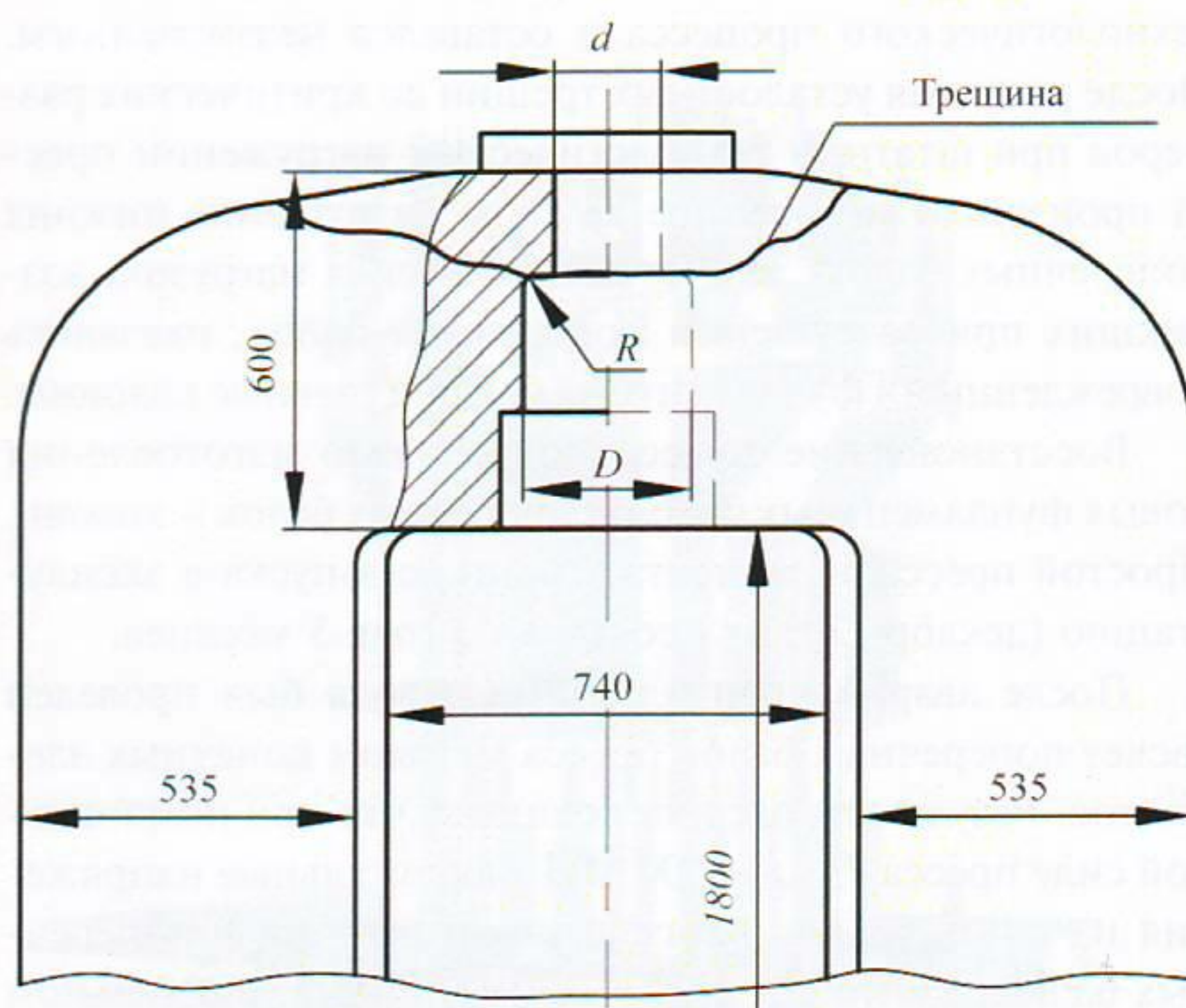


Рис. 5. Типовое разрушение станины трещиной усталости на примере непрерывного стана 400

конструктивные концентраторы, где возникают максимальные напряжения, превышающие предел усталостной прочности материала, расположены в недоступных для прямого наблюдения местах. В этом случае длительные процессы возникновения и роста усталостных трещин остаются незамеченными и проявляются в виде «внезапного» разрушения, после достижения усталостной трещиной критического размера.

На рис. 5 показана схема верхней поперечины станины непрерывного стана 400 с отверстием диаметром d

для размещения нажимного винта и диаметром D для размещения гайки нажимного винта. Типовое разрушение станины усталостной трещиной, которая началась на поверхности радиусной галтели R опорной площадки под нажимную гайку, показано на том же рисунке.

Максимальные напряжения возникают на поверхности радиусной галтели R , которая недоступна для прямого наблюдения. В работе [1] показано, что при $R/d < 0,1$ максимальные напряжения $\sigma_{\max}$ превышают предел усталостной прочности материала σ_0 , что дает запас усталостной прочности $n = \sigma_0/\sigma_{\max} < 1$ и делает закономерным возникновение и рост усталостных трещин. Рост усталостных трещин в дальнейшем приводит к «внезапному» разрушению станины.

Предупреждение «внезапных» разрушений станин и связанных с этими разрушениями последствий аварийных ситуаций осуществляется на основе своевременной экспертизы фактического состояния станин. По результатам экспертизы в случае необходимости разрабатываются и внедряются технические решения, обеспечивающие их дальнейшую длительную долговечность. Покажем комплекс работ по обеспечению прочностной надежности действующих станин на примере станин клетки № 2 стана 1700.

Рабочая клеть № 2 в составе оборудования стана 1700, спроектированная и изготовленная «НКМЗ» (Украина), рассчитана на максимальную силу прокатки 20 МН. В рамках интенсификации производства необходимо увеличить максимальную силу прокатки в 1,5 раза, до 30 МН.

Первым этапом работ по обеспечению прочностной надежности действующих станин является экспертиза их состояния на данный момент эксплуатации. Для оценки прочности станин и установления зон возможного возникновения трещин проводится расчет напряженного состояния станин с учетом реальных геометрии и условий нагружения. Станины клетей прокатных станов имеют сложную геометрическую форму и работают в силовом контакте с сопряженными деталями, поэтому метод расчета должен позволять находить как геометрические и силовые граничные условия в зонах контакта отдельных деталей, так и величины максимальных напряжений в зонах конструктивных концентраторов. Для решения этих задач при исследовании напряженно-деформированного состояния станин клетки стана 1700 в программном комплексе ANSYS был реализован метод конечных элементов (МКЭ).

Опишем математическую расчетную модель станины стана 1700. Станина имеет две плоскости симметрии, что позволяет представить расчетную модель в виде 1/4 части станины (рис. 6). Нагрузка прикладывается в виде равномерно распределенного давления на поверхность контакта верхней поперечины станины с гайкой нажимного винта и на контактную поверхность нижней поперечины станины с подушкой нижнего опорного вала. Граничные условия на перемещения накладываются по плоскостям симметрии. Станины клетки выполнены из литой стали 25Л, поэтому для расчета были приняты модуль упругости $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа и коэффициент Пуассона

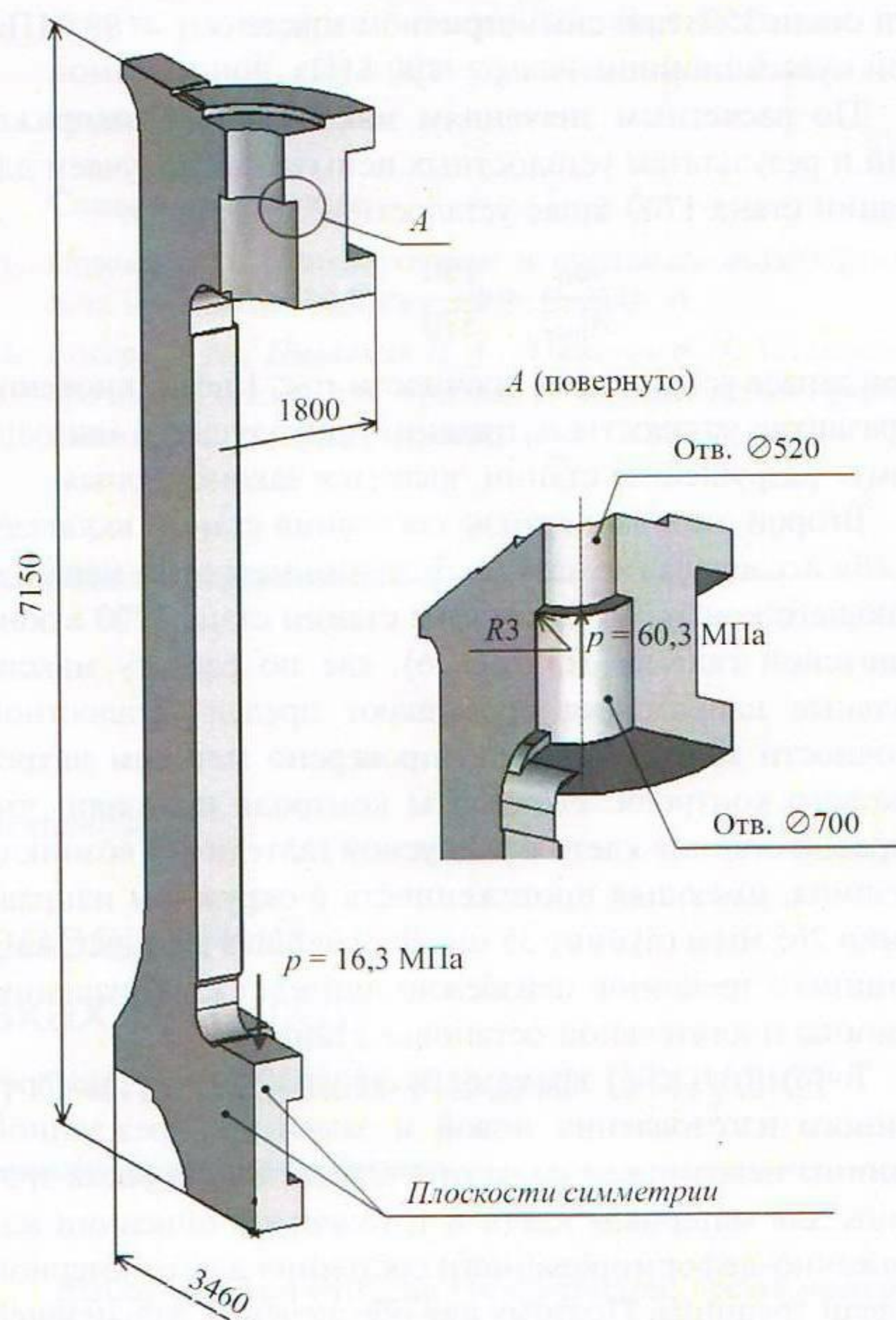


Рис. 6. Расчетная модель станины стана 1700

$\mu = 0,27$. Сила, приложенная к модели, соответствует номинальной нагрузке на клеть, составляющей 20 МН, что дает распределенную нагрузку в зоне контакта с нажимной гайкой 60,3 МПа, а в зоне контакта с подушкой опорного вала 16,3 МПа. На цв. илл. 1 а показан фрагмент разбиения на конечные элементы объема материала в зоне галтели радиусом 3 мм опорной поверхности под нажимную гайку.

Результаты расчета показали, что в станинах стана 1700 наибольшие напряжения $\sigma_{\max} = \sigma_1 = 370$ МПа возникают на поверхности галтели радиусом 3 мм в зоне контакта верхней поперечины станины с гайкой нажимного винта (цв. илл. 1 б); напряжения в остальных конструктивных концентраторах станин не превышают 100 МПа.

Станины клетей работают в условиях пульсационного цикла нагружения. В справочной литературе нет данных об усталостных испытаниях образцов, вырезанных из крупногабаритных заготовок стали 25Л. Достаточно полные усталостные испытания проведены для стали 35Л [2]. Материал станины из стали 25Л и материал заготовки из стали 35Л для усталостных испытаний, проведенных в [2], близки по химсоставу, механическим свойствам и технологии изготовления. По результатам усталостных испытаний получены пределы выносливо-

сти стали 35Л: при симметричном цикле $\sigma_{-1} = 96$ МПа, при пульсационном — $\sigma_0 = 190$ МПа.

По расчетным значениям максимальных напряжений и результатам усталостных испытаний получаем для станин стана 1700 запас усталостной прочности

$$n = \frac{\sigma_0}{\sigma_{\max}} = \frac{190}{370} = 0,51 < 1.$$

При запасе усталостной прочности $n < 1$ возникновение и развитие усталостных трещин, приводящее к «внезапному» разрушению станин, является закономерным.

Второй этап экспертизы состояния станин включает в себя исследование натурных станин методами неразрушающего контроля. Состояние станин стана 1700 в зоне радиусной галтели $R3$ (рис. 6), где по расчету максимальные напряжения превышают предел усталостной прочности материала, было проверено методом вихревого контроля. Результаты контроля показали, что в правой станине клетки в радиусной галтели $R3$ возникла трещина, имеющая протяженность в окружном направлении 265 мм и глубину 35 мм. Дальнейшая эксплуатация станины с трещиной неизбежно приведет к разрушению станины и длительной остановке стана.

Точный подсчет времени эксплуатации для своевременного изготовления новой и замены поврежденной станины невозможен из-за отсутствия закона роста трещины для материала клетки и трудности в описании напряженно-деформированного состояния для трехмерной модели трещины. Поэтому для обеспечения дальнейшей безотказной работы станин необходимо осуществить их модернизацию с обеспечением неограниченной долговечности галтельных переходов как при проектной, так и при увеличенной в 1,5 раза нагрузке на станины.

Первым этапом модернизации является заварка выявленных трещин по специальной технологии на месте без предварительного нагрева и последующей термообработки станины, что позволяет сохранить первоначальные геометрические размеры станины и точность установки сопряженных деталей.

На втором этапе на месте с применением мобильного расточного оборудования изменяется геометрия радиус-



Рис. 7. Конструкция галтельного перехода с заглублением в вертикальную стенку отверстия для установки гайки нажимного винта

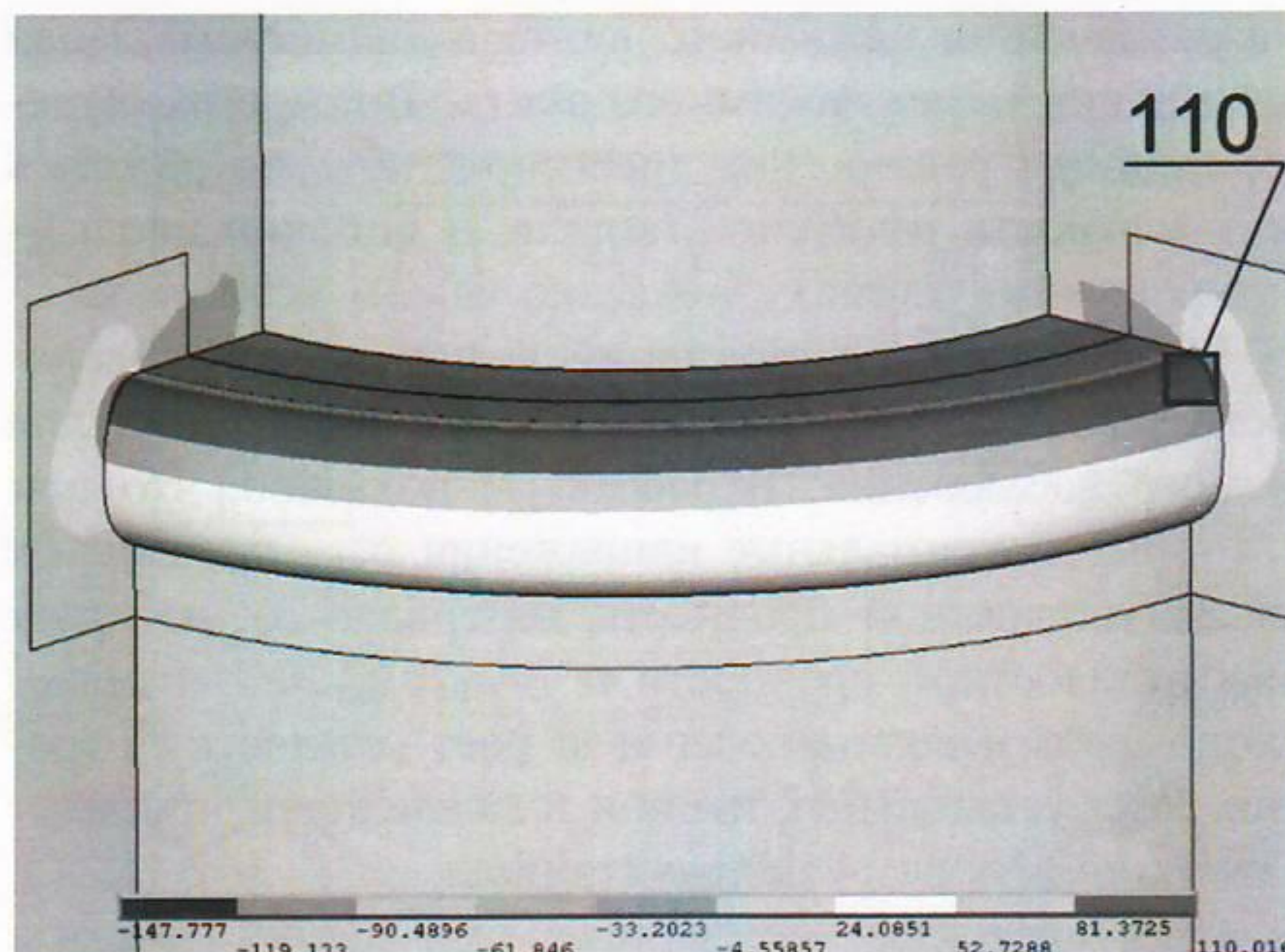


Рис. 8. Напряженное состояние (σ_1 , МПа) галтельного перехода с заглублением в вертикальную стенку отверстия для установки гайки нажимного винта

ной галтели с заглублением ее в вертикальную стенку отверстия диаметром 700 мм для установки гайки нажимного винта (рис. 7). Спрофилированная галтель позволяет снизить напряжения в концентраторе в 3,36 раз, с 370 до 110 МПа (рис. 8), что дает запас усталостной прочности

$$n = \frac{\sigma_0}{\sigma_{\max}} = \frac{190}{110} = 1,73 > 1$$

и обеспечивает долговечность станины без ограничения времени эксплуатации при номинальной силе прокатки.

Неограниченная долговечность станин обеспечивается и при увеличении силы прокатки до 30 МН. Запас усталостной прочности при этой силе прокатки будет равен $n = 1,15 > 1$.

Выводы

1. Опыт эксплуатации тяжелых металлургических машин показывает, что длительные простои производства, значительные расходы на ремонт и запасные части связаны с «внезапными» разрушениями их базовых деталей, вызванными возникновением и длительным развитием усталостных трещин.
2. «Внезапность» разрушения объясняется как недоступностью мест возникновения трещин, так и отсутствием информации о запасах усталостной прочности в зонах конструктивных концентраторов напряжений.
3. Предупреждение «внезапных» разрушений базовых деталей и связанных с этими разрушениями аварийных ситуаций осуществляется на основе полностью разработанных и широко применяемых методов экспертизы фактического состояния базовых деталей с установлением запасов усталостной прочности в местах конструктивных концентраторов напряжений.
4. По результатам экспертизы осуществляется модернизация базовых деталей путем внедрения специаль-

ных технических решений, обеспечивающих необходимое увеличение запасов усталостной прочности.

5. Модернизация базовых деталей тяжелых металлургических машин показана на примере станин клетки прокатного стана 1700. Изменение конструкции галтели в верхней поперечине станины, осуществленное без изменения компоновки деталей нажимного устройства, позволило снизить максимальные напряжения в действующих станинах в 3,36 раза и обес-

печить их неограниченную долговечность как при номинальной, так и при увеличенной в 1,5 раза силе прокатки.

Список литературы

1. Морозов Б. А. Моделирование и прочность металлургических машин. М.: Машгиз, 1963. С. 284.
2. Гохберг П. М., Пылайкин П. А., Юшкевич В. И. Усталостная прочность сталей для прессов // Производство крупных машин. М.: Машиностроение, 1971. С. 10–34.

УДК 621.9

А. Г. Гуленко, канд. техн. наук;

В. В. Цуканов, д-р техн. наук

(ФГУП «ЦНИИ КМ „Прометей”», г. Санкт-Петербург)

Расчетная оценка уровня напряжений в крупногабаритных заготовках деталей энергомашиностроения при охлаждении после отпуска

Уровень остаточных напряжений в крупногабаритных заготовках деталей энергомашиностроения, судостроения и других отраслей промышленности, использующих для своих нагруженных агрегатов стальные термообрабатываемые заготовки, в значительной мере определяет стабильность их размеров, формы и в целом — работоспособность конструкции. К таким элементам могут относиться, к примеру, следующие детали: крупногабаритные судовые валы; заготовки роторов — цельнокованные и для сварных конструкций; обечайки для корпусов реакторов АЭУ и т. д. Их вес может колебаться от нескольких тонн до нескольких десятков тонн, сечение — от 200 до 1200 мм и более.

При изготовлении заготовок роторов и элементов корпусов реакторов АЭУ применяется два режима отпуска:

- *основной режим*, при котором отпуск заготовок проводится после операции закалки, затем заготовки уже не подвергаются высокотемпературному нагреву в диапазоне температур отпуска, влияющих на изменение их механических свойств; примером может служить изготовление заготовок цельнокованных роторов;
- *технологический режим* (после сварки и после наплавки), при котором отпуск заготовок проводится после сварки заготовок или группы (блока) заготовок между собой; этот режим применяется, например, для сварного ротора, когда сварной шов соединяет две части ротора, и для корпуса реактора АЭУ, имеющего от 1 до 6–7 сварных швов (например, в корпусе реактора типа ВВЭР-1000).

Выбор режима отпуска (температура, время выдержки, скорость охлаждения после отпуска) зависит от многих факторов — категории прочности стали, склонности стали к отпускному охрупчиванию, сочетанию отпускостойчивости основного металла и металла сварного шва и ряда других аспектов.

Целью работы является изучение возможных технологических режимов охлаждения после проведения отпуска как завершающей стадии термической обработки для заготовок сварных и цельнокованных роторов паровых турбин, а также определение текущих и остаточных напряжений при заданных режимах охлаждения и выбор рекомендаций по режимам охлаждения после отпуска, на основании полученных результатов.

Выбор режима отпуска для цельнокованных роторов

Выбор основных параметров отпуска — температуры и времени выдержки — определяется исходя из требований необходимой категории прочности (например, 60–85 кгс/мм²) в сочетании с требуемым запасом пластичности и вязкости. Время выдержки обычно назначается в зависимости от сечения термообрабатываемых заготовок, отпускостойчивости стали и составляет ~ 4–6 мин/мм сечения заготовок. При этом необходимо отметить некоторую склонность к отпускному охрупчиванию стали Cr–Ni–Mo–V композиции при содержании никеля ~3–4% и повышенном содержании фосфора. Это явление проявляется в повышении критической темпе-