

На правах рукописи

ЛАВРИН ВАЛЕНТИН ГЕОРГИЕВИЧ

**Методика обеспечения работоспособности листовых
элементов машиностроительных конструкций**

**Специальность 05.02.02- Машиноведение, системы приводов и детали
машин**

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

Санкт-Петербург- 2011

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель доктор технических наук, профессор Носов Виктор Владимирович.

Официальные оппоненты:

зав. каф «Приборы контроля и системы экологической безопасности» Северо-западного заочного государственного технического университета, заслуженный деятель науки Российской Федерации, д.т.н., проф. Потапов Анатолий Иванович,

заведующий лабораторией промышленных исследований и неразрушающего контроля ОАО «НПО ЦКТИ»; к.ф-м.н., Нефедьев Евгений Юрьевич,

Ведущая организация:

Институт проблем машиноведения РАН.

Защита состоится « 27 » декабря 2011г. в 16.00 на заседании диссертационного совета Д 212.229.12 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
1 учебный корпус, аудитория 41

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан « 25 » ноября 2011г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Евграфов А.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Всё большее применение для изготовления деталей и элементов конструкций объектов машиностроения получает стальной горячекатаный лист. Одной из традиционных областей применения стального листового материала является изготовление металлоконструкций крупногабаритных объектов машиностроения, которым свойственны малые партии производства, высокая стоимость, повышенная опасность эксплуатации и степень ответственности. Одним из наиболее важных показателей надёжности таких объектов является ресурс. Ресурс габаритных машин, в большинстве случаев, определяется надёжностью металлоконструкций, которая лимитируется разрушением их материала. Наиболее распространёнными местами разрушения металлоконструкций являются соединения листовых элементов. Реже разрушение протекает в самих листовых элементах конструкции, однако оно в меньшей степени поддаётся прогнозу и приводит к большому ущербу.

Работоспособность деталей машин и элементов конструкции может быть обеспечена на этапах их проектирования, изготовления и эксплуатации. Эффективность методов обеспечения работоспособности на стадии проектирования ограничена полнотой информации о проектируемом объекте и условиях его эксплуатации. Методы диагностики, применяемые на этапе эксплуатации, направлены, главным образом, на обнаружение опасных дефектов в зонах соединения листовых элементов. Особенности материала элементов конструкций и изготавливаемых из него деталей существенно снижают эффективность применения данных методов для контроля наличия опасных дефектов в листовых элементах, а также значительно усложняют и удорожают процесс контроля. Наименее развитым и потому наиболее перспективным методом обеспечения работоспособности листовых элементов машиностроительных конструкций является тщательный контроль листового материала на стадии его производства. Для повышения эффективности контроля дефектности листового металла предлагается разработать методику контроля его прочностного состояния объектов, основанную на регистрации с помощью метода акустической эмиссии (АЭ) процесса накопления повреждений материала используемых для производства листового металла заготовок.

Цель работы состояла в создании методики обеспечения работоспособности листовых элементов металлоконструкций объектов машиностроения на стадии их производства по результатам контроля состояния технологических заготовок на основе метода АЭ.

Задачи исследований

1. Обоснование эффективности мероприятий по обеспечению работоспособности листовых элементов металлоконструкций на этапе изготовления посредством контроля прочностного состояния технологических заготовок для производства листа.

2. Формулировка показателя прочностного состояния материала заготовки и обоснование его связи с прочностным состоянием листа.

3. Обоснование целесообразности применения метода АЭ для контроля

прочностного состояния заготовок как метода наблюдения за процессом накопления повреждений в материале заготовки в момент её диагностического нагружения.

4. Проведение и анализ результатов экспериментальных исследований по контролю методом АЭ параметров прочностного состояния заготовок для производства листового проката, сопоставление результатов контроля с результатами визуального выявления дефектов полученной полосы.

5. Формулировка и оценка диагностического параметра состояния заготовок, связанного с критерием работоспособности стального листа;

6. Разработка методики обеспечения работоспособности стального листа и её адаптация к технологическому процессу производства горячего проката.

Проблемы контроля прочности конструкционных материалов являются предметом интенсивного исследования специалистами в области физики, механики и микромеханики разрушения, неразрушающего контроля и диагностики. Большой вклад в решение проблемы механики разрушения внесли Болотин В.В., Работнов Ю.Н., Журков С.Н., Регель В.Р., Слуцкер А.К., Томашевский Э.Е., Куксенко В.С., Петров В.А., Веттегрень В.И. и др.; в развитие неразрушающего контроля и диагностики, оценки прочности различного рода материалов и технических объектов Иванов В.И., Грешников В.А., Дробот Ю.В., Башкарёв А.Я., Ключев В.В., Потапов А.И., Куксенко В.С., Савельев В.Н., Недосека А.Я., Нефедьев Е.Ю., Носов В.В., Трипалин А.С., Буйло С.И., Баранов В.М., Бырин В.Н. и др.

Предметом исследования является методика АЭ контроля дефектности технологических заготовок для производства стального листа. Методика разрабатывается с целью обеспечения работоспособности листовых элементов металлоконструкций объектов машиностроения на стадии их производства посредством выявления дефектных заготовок или их фрагментов. Разработки опираются на результаты теоретических и экспериментальных исследований развития дефектов заготовок при их технологической обработке, регистрации АЭ заготовок, статистического, физического и имитационного компьютерного моделирования.

Особенность предлагаемой методики контроля заключается в использовании нового показателя состояния и вытекающего из него критерия дефектности технологических заготовок. В отличие от существующих методик, в которых дефектность связывалась с геометрическими параметрами несплошностей в материале заготовок, в разрабатываемой методике используются параметры прочностного состояния микроструктуры их материала. Сложность создания методики заключалась в обосновании связи показателя прочностного состояния материала заготовок с работоспособностью листовых элементов, что представляет собой научную новизну.

Научную новизну работы составляют:

-Формулировка и обоснование возможности обеспечения работоспособности листовых элементов металлоконструкции посредством контроля прочностного состояния заготовки на стадии производства листа;

-Предложенный показатель прочностного состояния материала заготовки;

- Модель преобразования прочностного состояния материала заготовки в состояние материала листа в процессе технологической обработки;
- Диагностический параметр состояния заготовок, связанный с Критерием работоспособности листовых элементов;
- Диагностический признак состояния заготовок, используемый для подготовки к технологическому процессу производства листа;
- Методика обеспечения работоспособности листовых элементов машиностроительных конструкций.

Методологической основой исследований является микромеханическая модель разрушения и АЭ гетерогенных материалов. **Теоретические исследования** проведены с использованием микромеханической модели АЭ, имитационного компьютерного моделирования процесса разрушения гетерогенных материалов. **Экспериментальные исследования** проведены на литых металлических образцах, изготовленных из различных материалов с типичными технологическими дефектами, промышленных заготовках для изготовления листа. В ходе экспериментов проводилось диагностическое нагружение заготовок и регистрация АЭ с использованием соответствующей современным требованиям компьютеризированной двухканальной измерительной системы (СДАЭ-16-2), позволяющей наблюдать за процессом накопления повреждений в режиме реального времени и автоматизировать обработку регистрируемой АЭ информации.

Научные положения, выносимые на защиту:

- Показатель прочностного состояния материала заготовки;
- Модель преобразования прочностного состояния материала заготовки в процессе пластической деформации;
- Диагностические параметр и признак состояния заготовок, связанный с критерием работоспособности листовых элементов;
- Методика обеспечения работоспособности листовых элементов машиностроительных конструкций.

Достоверность научных положений подтверждается сопоставлением результатов теоретических и экспериментальных исследований, имитационного компьютерного моделирования, регистрации сигналов АЭ, результатами статистической обработки экспериментальных исследований.

Практическая ценность результатов связана со снижением материальных и временных затрат для производства листа, которое обусловлено повышением эффективности контроля, ориентированного на эксплуатационные качества листа, снижением доли производства некондиционного листового металла, снижением вероятности отнесения в брак качественных заготовок.

Область применения результатов. Результаты исследований могут быть использованы в производстве непрерывнолитых заготовок для оценки уровня качества заготовок и снижения выхода бракованной продукции; в производстве горячекатаной полосы для обеспечения безаварийности производственного процесса и неразрушающего контроля прочностных характеристик полосы.

Апробация и внедрение результатов.

Работа является победителем конкурса грантов 2011 года для студентов, аспирантов вузов и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга; связана с проектом «Разработка технологии неразрушающего контроля и диагностики состояния структурно-неоднородных технических объектов на основе микромеханической модели акустической эмиссии гетерогенных материалов», договор № 383/09 от 30.10.2009, выполненном при поддержке правительства Санкт-Петербурга в сфере научной и научно-технической деятельности; является продолжением работы по оценке возможности использования метода акустической эмиссии для контроля макроструктуры литых слябов, выполненной в соответствии с договором №5316-22123 от 02.06.2005, для ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат»; результаты работы докладывались на межвузовских, всероссийских и международных конференциях, семинарах кафедр Машиноведения и деталей машин СПбГПУ, внедрены в учебный процесс подготовки специалистов по специальности «Динамика и прочность машин» и магистров по направлению «Прикладная механика».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав и списка литературы. Диссертация изложена на 146 стр., содержит 44 рисунка, 2 таблицы, 101 библиографический источник.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении дан анализ состояния проблемы, показана её актуальность и подходы к решению, приведена общая характеристика работы.

В первой главе сформулированы цель и задачи исследований, намечены пути и определена методология их решения.

В современном машиностроении всё большее распространение получает применение листовой стали. В большинстве случаев листовая сталь в машиностроении применяется для производства несущих конструкций крупногабаритных машин. Практически все такие машины весьма дорогостоящие или ответственного назначения. Задача повышения эффективности использования металла при производстве машин и механизмов сводится к снижению затрат материала при обеспечении работоспособности.

Для крупногабаритных машин потеря работоспособности чаще всего связана с разрушением элементов несущих конструкций, надёжность которых лимитируется накоплением повреждений в зонах шва или листовых элементах. На современном этапе развития технологий контроля существует значительное количество методов диагностики для своевременного выявления дефектов в материале швов и околошовной зоне. Из-за особенностей листового материала и конфигурации конструкций, применение таких технологий для контроля листового материала неэффективно или связано со значительным повышением затрат. Анализ возможностей снижения риска потери работоспособности объектов машиностроения по причине разрушения листовых элементов конструкций показал, что наиболее перспективным является проведение неразрушающего контроля прочностных характеристик материала на стадии производства листа.

Дается анализ существующим методам и технологиям неразрушающего

контроля качества листов и заготовок, отмечается, что используемые показатели качества не связаны с функциональными свойствами, в частности, прочностными характеристиками материала. Большинство технологий ориентированы на обнаружение дефектов в виде нарушений целостности материала листа, наличия в материале включений, отклонения геометрических размеров, что не всегда достаточно точно характеризует качество готовой продукции с точки зрения обеспечения работоспособности конструкций.

Хорошие результаты в области неразрушающего контроля прочностных характеристик в других областях техники были получены благодаря применению метода АЭ. Возможным вариантом адаптации метода АЭ контроля для поддержания должного уровня качества стального листа может стать использование его в качестве входного контроля технологических заготовок. Это позволит повысить качество получаемой продукции и сократить затраты на её производство за счёт снижения вероятности переработки дефектных заготовок, приводящих к получению заведомо бракованной продукции.

Формулируются цель и задачи исследований, ориентированные на разработку методики контроля прочностного состояния заготовки в момент её упругого нагружения в охлаждённом состоянии, основанной на получении АЭ информации.

Вторая глава посвящена теоретическому исследованию, формулировке показателя состояния и обоснованию связи процессов накопления повреждений в материале заготовки, процессов развития дефектов при механическом воздействии на неё и прочностным состоянием готового листа.

Проанализированы существующие показатели качества проката и принципы классификации его дефектов. Согласно ГОСТ 21014-88 «ПРОКАТ ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ. Термины и определения дефектов поверхности», дефекты подразделяются по периоду проявления в виде несплошности на дефекты поверхности, обусловленные качеством заготовки; дефекты поверхности, образовавшиеся в процессе деформации; дефекты поверхности, образовавшиеся при отделочных операциях. При этом к опасным дефектам относятся все нарушения структуры материала, выраженные в виде несплошностей или инородных включений. Отмечено, что наличие подобных дефектов в материале заготовки не является однозначным признаком образования опасного дефекта в листовом материале или снижения показателей прочности листа. По этой причине актуальным является разработка классификации дефектов заготовок по степени влияния данного дефекта на качество полосы.

В проводимой работе показателем качества материала заготовки является показатель её прочностного состояния, определяющий интенсивность процесса накопления повреждений и развития дефектов в материале заготовки при её технологическом нагружении и качество готового листа. Дефекты понимаются как области концентрации напряжений либо разупрочнения материала, связанные с повышенной интенсивностью его разрушения в процессе изготовления и дефектностью листа.

Для оценки степени опасности дефектов предлагается использовать методологию, опирающуюся на регистрацию сигналов АЭ, связанных с процессами повреждаемости и перестройки структуры материала. Предпосылкой существования связей АЭ с дефектностью и прочностным состоянием заготовок явились результаты обработки данных, полученных в ходе промышленных АЭ испытаний заготовки при её упругом нагружении собственным весом на НЛМК. Амплитуда и энергия сигналов АЭ, регистрируемых при нагружении, коррелировали с величиной напряжений и размерами дефектов, выявленных в слябе после исследования его макроструктуры. Устойчивых корреляций между первичными параметрами АЭ заготовок и прочностным состоянием или дефектностью листа выявить не удалось, что объяснялось влиянием дестабилизирующих факторов и недостаточной информативностью статистического подхода в этих условиях. Это предполагало необходимость детального изучения процессов, происходящих в материале заготовки в процессе её обработки.

Процесс формоизменения заготовки является результатом суперпозиции одновременно протекающих в материале двух конкурирующих процессов изменения структуры: пластической деформации, при которой разрушение одних связей между структурными элементами материала компенсируется возникновением новых связей, что может приводить к упрочнению материала, и разрушения, при котором происходит разрыв связей без последующего их восстановления. Развитие несплошностей в деформируемом материале является результатом превосходства процессов разрушения над процессами упрочнения структуры.

При проведении диагностического нагружения происходит интенсивное разрушение структурных элементов вблизи макродефекта. При опасном прочностном состоянии элементов материала скорость накопления повреждений становится высокой, что может приводить к формированию условий для прораствания дефекта при приложении технологической нагрузки в процессе пластической деформации. В случае низкой опасности макродефектов материала возможно их «залечивание» в результате процессов пластической перестройки структуры в момент прокатки.

В качестве инструмента теоретических исследований был использован математический аппарат и микромеханическая модель разрушения, развиваемой методологии прогнозирования разрушения гетерогенных материалов с помощью АЭ. Протекание во время механического воздействия на заготовку процессов моделировалось накоплением концентрации C микротрещин в условиях структурной неоднородности, сопровождаемым изменением её прочностного состояния.

В качестве основного критерия прочностного состояния структурного элемента использовалось время Θ до его разрушения, описываемое *формулой Журкова*:

$$\Theta = \tau_0 \exp[(U_0 - \gamma\sigma)/(KT)] = \tau_0 \exp(U_0/KT - \omega), \quad (1)$$

где $\tau_0 = 10^{-12} \div 10^{-14}$ с - период атомных колебаний, U_0 - энергия активации процесса разрушения, γ - структурно-чувствительный параметр, σ -

напряжения на структурном элементе, K - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура, $\omega = (\gamma\sigma)/(KT)$ – параметр прочностного состояния.

В общем случае, наблюдение за параметрами процесса накопления повреждений в объекте контроля методикой, основанной на микромеханической модели АЭ гетерогенных материалов, характеризуется применением формулы, связывающей информативные параметры ξ зарегистрированных акустических сигналов и параметры C процесса разрушения структурных элементов материала:

$$\xi(t) = V \iiint_{\Delta t, f, U} \Phi(\Delta t, f, U) dU df d\Delta t C_0 \int_{\mu}^{\mu+\Delta\omega} \Psi(\omega) \{1 - \exp[-\int_0^t ds / \Theta(U_0, \omega(s))]\} d\omega, \quad (2)$$

где V - контролируемый объем материала, $\Phi(\Delta t, f, u)$ - плотность вероятности распределения сигналов АЭ по интервалам Δt (паузам) между ними, амплитуде U и частоте f , t - текущее время, C_0 - начальная концентрация структурных микроэлементов, $\Psi(\omega)$ - функция плотности распределения параметра ω прочностного состояния по структурным элементам, $\mu, \Delta\omega$ - параметры распределения. Информацию о процессе разрушения и функции $\Psi(\omega)$ несут в себе сигналы АЭ, временные зависимости параметров $\xi(t)$ которых регистрируются экспериментально. В выражение (2) входит акустико-эмиссионный коэффициент

$$k_{AE} = V \iiint_{\Delta t, f, U} \Phi(\Delta t, f, U) dU df d\Delta t$$

Для подтверждения адекватности модели и возможности её использования для контроля технологических заготовок в условиях реального производственного процесса было проведено сопоставление результатов акустико-эмиссионного контроля технологической заготовки полученных в ходе экспериментов на НЛМК и компьютерного моделирования процесса разрушения структурных элементов материала (при использовании оригинальной программы Graph, выполненной в MS Excel-97). Сравнение показало высокую степень соответствия экспериментальных и теоретических данных (Рис. 1. а).

Проведённые эксперименты показали, разрушение упруго нагружаемой заготовки имеет этапы неоднородного и однородного микротрещинообразования, а при выходе на этап однородного разрушения (Рис.1.) (такой выход гарантирован соотношением параметров имитационной модели $\omega_0, \omega_1, \omega_2$: $\omega_1/\omega_0 < 1$ и $\omega_2/\omega_0 < 1$) оценка параметров $\Psi(\omega_3)$ сводится к оценке диагностического параметра:

$$W_{AE} = d \ln \xi / dK_H \approx \omega,$$

где :

$$dK_H \approx \Delta K_H = K_{H2} - K_{H1},$$

K_{H1} и K_{H2} - коэффициенты нагрузки, определяемый по формуле:

$$K_{H2} = \frac{\sigma_{\max 2}}{\sigma_T} \quad \text{и} \quad K_{H1} = \frac{\sigma_{\max 1}}{\sigma_T},$$

где $\sigma_{\max 1}, \sigma_{\max 2}$ значения максимальных напряжений в образце при диагностическом нагружении в разный момент времени, а σ_T – предел

текучести материала заготовки.

Определить параметры распределения $\psi(\omega)$ предлагается на основе обработки получаемой при упругом нагружении заготовки АЭ информации. Сложность определения параметра W_{AE} , связана с нелинейностью начального участка зависимости $\ln \xi(t)$ в момент разрушения структурных элементов со значениями ω из области «хвоста» функции $\psi(\omega)$. Условием адекватного определения W_{AE} является достижение в процессе диагностического нагружения прямолинейного участка данной временной зависимости в полулогарифмических координатах, соответствующему однородному разрушению при равномерном нагружении с постоянной скоростью роста напряжений $\dot{\sigma}$, и описываемого формулой:

$$\xi(t) = k_{AE} C_0 K T \exp[(\gamma \dot{\sigma} t - U_0)/(KT)] / (\tau_0 \gamma \dot{\sigma}), \quad (3)$$

продифференцировав логарифм уравнения (3) по σ и умножив на рабочее напряжение σ_T , получаем:

$$d \ln \xi(t) \sigma_T / d \sigma = \gamma \sigma_T / (KT).$$

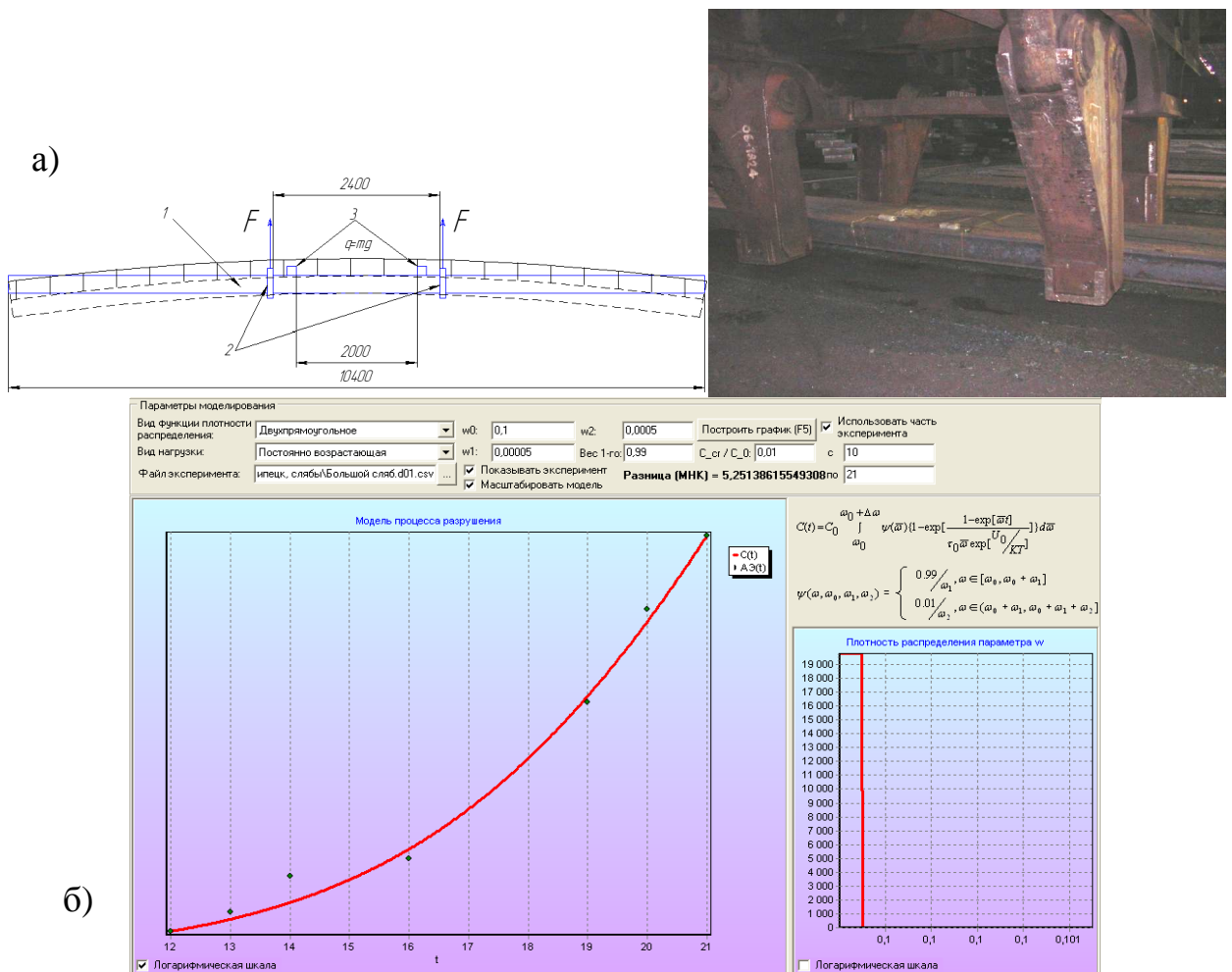


Рис. 1. а) Общий вид и схема нагружения при промышленных испытаниях (1-сляб, 2-захваты, 3-датчики АЭ); б) Сопоставление теоретической кривой разрушения структурных элементов материала заготовки и параметров АЭ при подъёме заготовки, разрушение однородное ($\omega_1 / \omega_0 < 1$, $\omega_2 / \omega_0 < 1$, $\omega_2 / \omega_1 = 1$) б).

Определение параметра W_{AE} заготовок ведётся по формуле:

$$W_{AE} = \omega_T = \frac{\gamma \sigma_T}{KT} = \frac{(\ln \xi_2 - \ln \xi_1)}{K_{H2} - K_{H1}}$$

где ξ_1, ξ_2 – значения информативного АЭ параметра при максимальных напряжениях в сечении и $\sigma_{max 1}, \sigma_{max 2}$ соответственно. Изменение состояния материала заготовки моделировалось изменением параметров функции $\psi_3(\omega)$ плотности распределения параметра ω по структурным элементам заготовки (Рис. 2.), а результатом изменения структуры явились новое прочностное состояние, моделируемое функцией $\psi_{Д}(\omega)$ структурных элементов готового листа. В процессе изменения часть элементов распределения $\psi_3(\omega)$ со значениями $\omega > \omega_{крит3}$, соответствующие наиболее дефектным структурным элементам, ухудшают своё прочностное состояние. Это проявляется либо в разрушении, либо увеличении параметра ω . Структурные элементы со значениями $\omega < \omega_{крит3}$ упрочняются в результате пластической перестройки структуры материала заготовки, что моделируется понижением параметра состояния ω структурных элементов. Параметры распределения $\psi_3(\omega)$ индивидуальны для каждой заготовки, а их определение предлагается на основе обработки АЭ с позиции микромеханической модели разрушения.

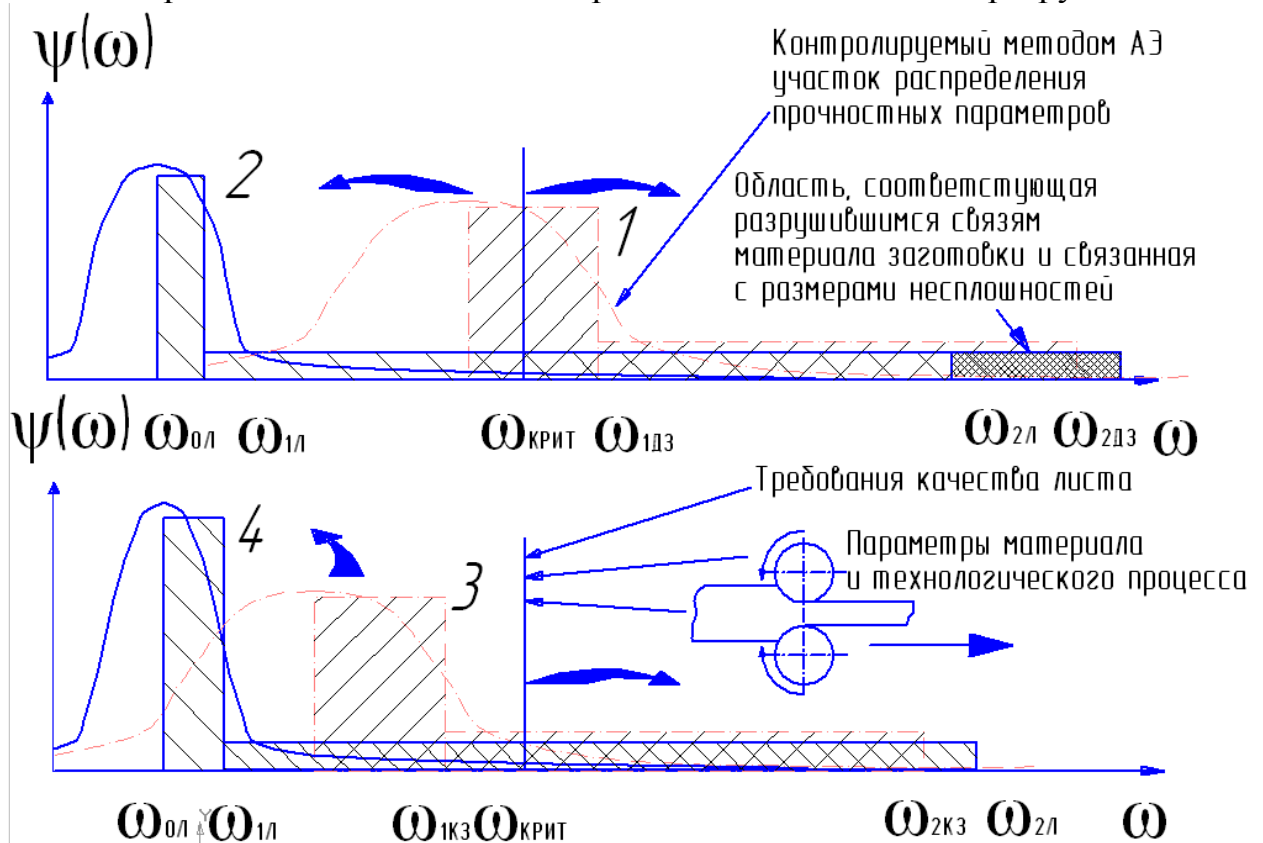


Рис. 2. Модель изменения прочностного состояния материала при пластической деформации. 1-график функции плотности распределения параметра прочностного состояния структурных элементов дефектной заготовки, 2-дефектного листа, 3-качественной заготовки, 4- качественного листа.

Информативность физического подхода позволяет определить границы разброса значений параметра состояния ω функции $\psi(\omega_{\text{Л}})$ листа. Минимальное значение $\omega_{0\text{Л}}$, соответствующее работоспособному состоянию листа, принимается равным $2\div 3$ на основании экспериментов по нагружению и АЭ-исследованию листовых элементов металлоконструкций, максимальное $\omega_{2\text{Л}}$, после которого распределение обрывается, соответствует значениям наименее долговечных структурных элементов, оставшихся после технологического воздействия и по приблизительным оценкам равно $\omega_{2\text{Л}} \approx 20\div 30$.

Параметр $W_{\text{АЭ}}$ характеризует прочностное состояние материала и показывает возможность развития дефектов. Физический смысл параметра $W_{\text{АЭ}}$ иллюстрирует его связь с характеристиками надёжности (ресурсом) и полезной площадью сечения, что подтверждается результатами экспериментальных исследований, проведённых ранее (Табл. 1)

Табл.1.

Значение коэффициента корреляции параметра $W_{\text{АЭ}}$ с параметрами характеристики прочности и дефектности

Коррелирующий параметр	Значение коэф. Корреляции
Разрушающая нагрузка $F_{\text{р}}$	0,832
τ – время до разрушения либо появления трещины	0,749
Скорость распространения трещины V	0,797
Полезная площадь $A_{\text{пол}}$ (при однородном нагружении)	0,914

Хорошая корреляция $W_{\text{АЭ}}$ с $A_{\text{пол}}$ (табл. 1.) явилась предпосылкой постановки методики экспериментальных исследований, направленных на установление корреляции показателя прочности $W_{\text{АЭ}}$ заготовки и полезной площади $A_{\text{пол}}$ или связанной с ним площади несплошностей листа, выявляемых визуально.

В третьей главе описаны образцы, аппаратура, методика и результаты экспериментальных исследования связи параметров сигналов АЭ литых образцов с параметрами дефектности полученных листов.

Цель проводимых экспериментов состояла в определении оптимального вида нагружения и проверке диагностической ценности параметра прочностного состояния $W_{\text{АЭ}}$ заготовки. Эксперимент включал проведение контроля лабораторных образцов, выполненных в виде литых заготовок, методом АЭ в процессе их упругого нагружения, пластическую деформацию этих образцов и контроль дефектности листов, полученных в ходе их пластической деформации. Исследовалась взаимосвязь значений параметров контроля заготовок методом АЭ и дефектности листов, полученных в ходе обработки образцов.

В ходе экспериментальных исследований были проведены две серии испытаний, отличающиеся применяемой схемой нагружения образцов для проведения контроля. Первая схема имитировала нагружение заготовки её собственным весом при использовании стандартного кранового оборудования (Рис. 2. б.) и проводилась по схеме (Рис. 3. а.). Схема нагружения образцов второй партии соответствовала наиболее приемлемой с точки зрения проведения АЭ контроля и проводилась по схеме (Рис. 3. б.).

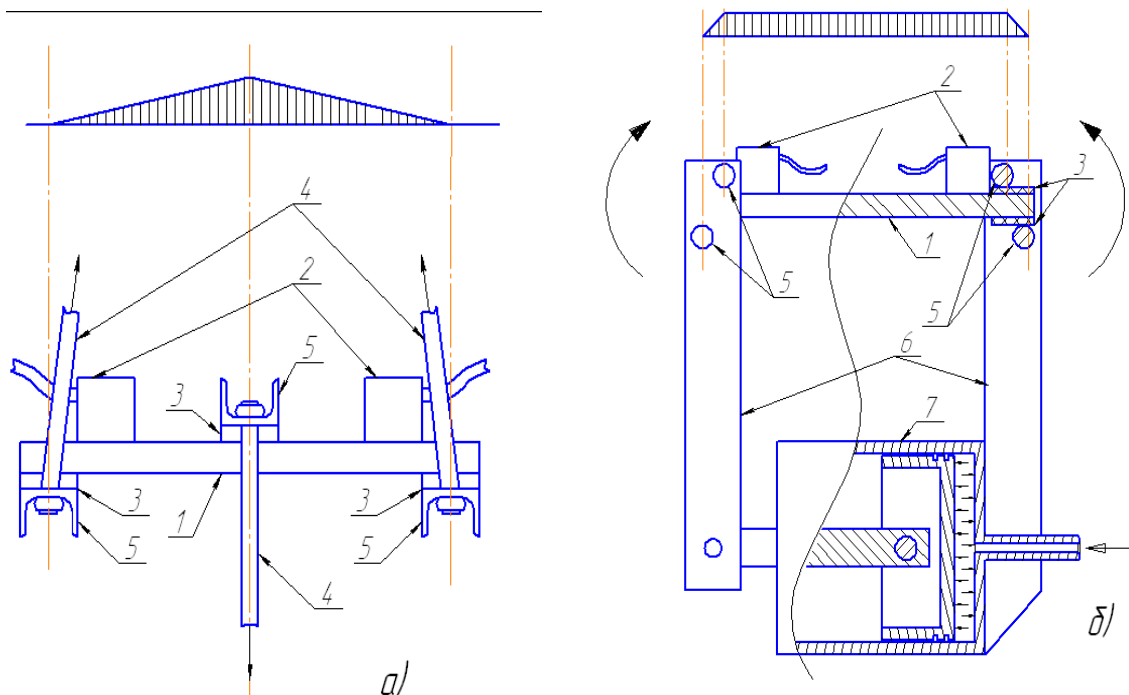


Рис. 3. Схема нагружения образцов первым способом для проведения АЭ контроля (1- Слиток; 2- Преобразователи АЭ 3 - виброизоляционный материал; 4- тяги нагружающего устройства; 5- опоры), схема нагружения образцов первым способом для проведения АЭ контроля. (1- Слиток; 2- Преобразователи АЭ 3 - Виброизоляционный материал; 5- опоры; 6- Рычаги; 7- Пневмоцилиндр).

Пластическая деформация осуществлялась в лабораторной прокатной клети при нагреве образцов до температуры «повышенной мягкости» материала (150°C). Относительная деформация образцов за один проход была задана в размере 15%. Полный цикл обработки проводился за пять проходов. Регистрация параметров дефектности листа проводилась визуально сканированием поверхности. Для количественной оценки качества листа были использованы геометрические характеристики дефектов, визуально выявляемых на поверхности, являющиеся производными от действующих стандартов.

подавляющее большинство поверхностных дефектов, обнаруженных в ходе контроля, представляли поперечные и продольные трещины, сквозные разрывы и рванины на кромках (Рис.4. г).

Для подтверждения выхода процесса контроля на этап однородного разрушения, для каждого образца были построены графики распределения среднеквадратичного отклонения параметров сигналов от аппроксимирующей прямой (Рис. 5.). По результатам построения определено, что большинство образцов выходит на этап однородного разрушения на момент от 50 до 75 % времени протекания нагружения, что свидетельствует о контролепригодности показателя $W_{\text{АЭ}}$.

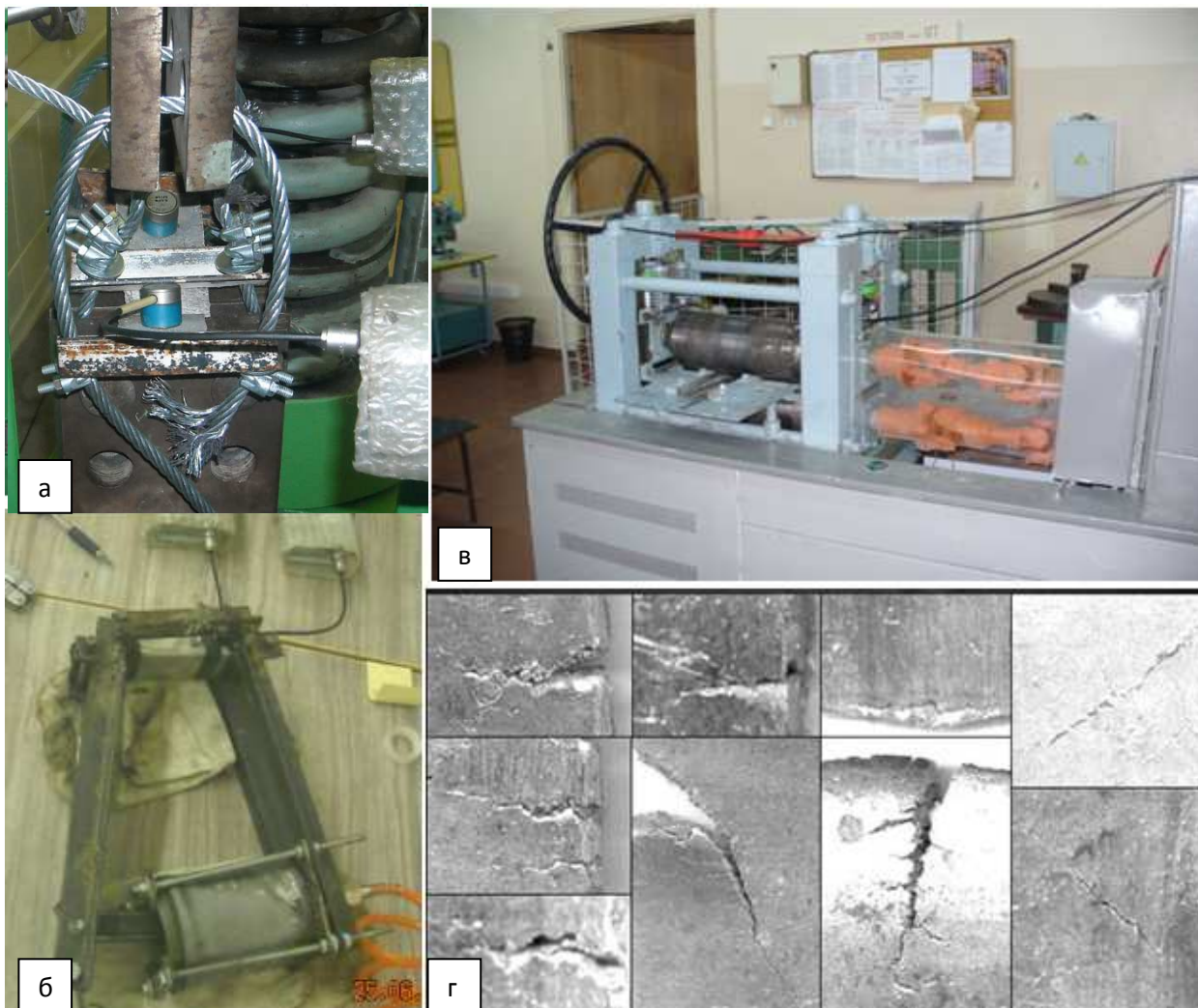


Рис. 4. Проведение экспериментов. Диагностическое нагружение (а,б), модель прокатной клетки (в), дефекты полученных листов (г).

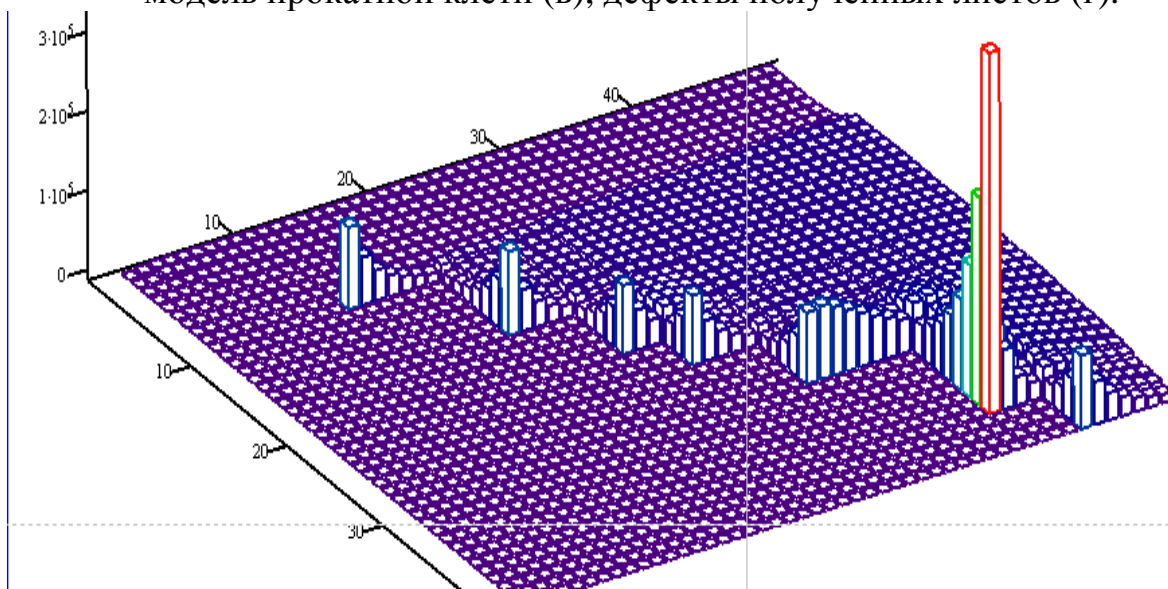


Рис. 5. График значений ср. кв. отклонений параметров акустической эмиссии от аппроксимирующей прямой.

Расчёт диагностического параметра W_{AE} проводился по значениям параметра ξ , полученным в интервале нагружения 62,5 до 75 % от предела текучести материала образцов (Рис. 6. и Рис. 7.).

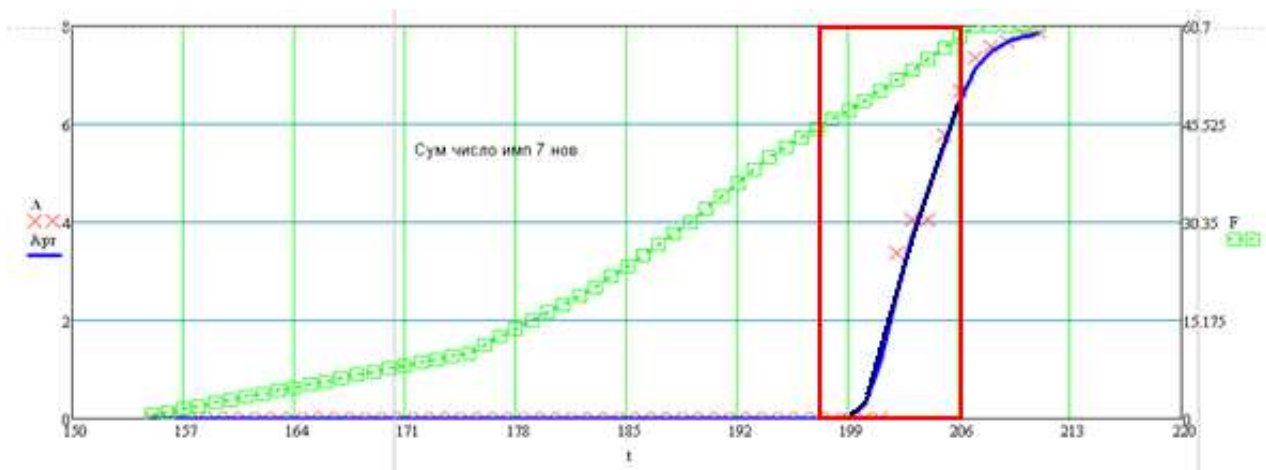


Рис. 6. Графики временных зависимостей логарифма суммарного числа сигналов для наиболее дефектного образца (№7 второй партии), и роста значений напряжений.

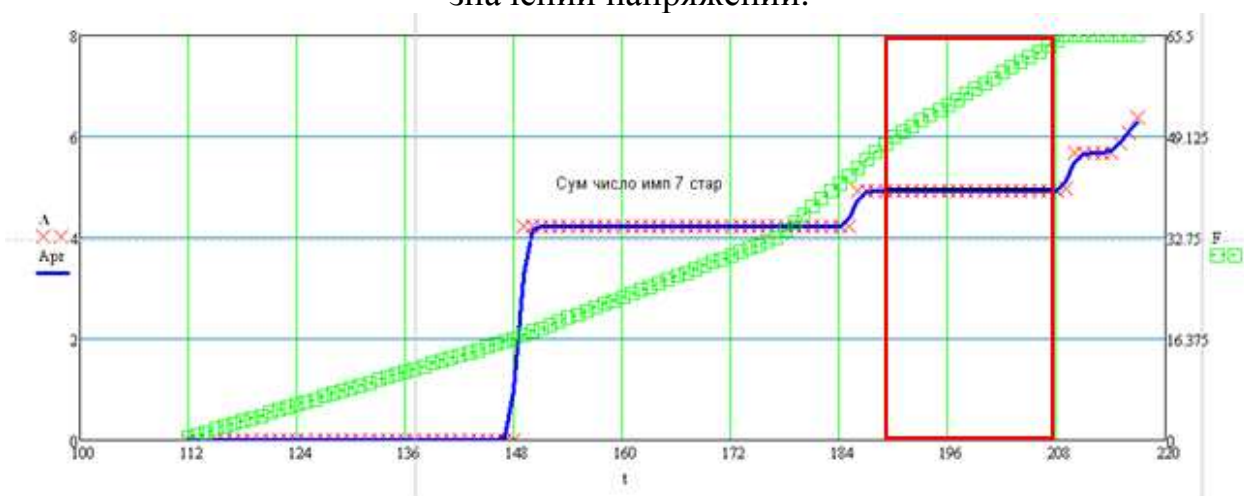


Рис. 7. Графики временных зависимостей логарифма суммарного числа сигналов для наименее дефектного образца (№7 первой партии), и роста значений напряжений.

Значения коэффициента корреляции для W_{AE} выбранного параметра и суммарной длины дефектов для второй группы образцов составило 0,82, для образцов двух групп вместе составило 0,74, что вполне удовлетворительно (Рис.8.). Данные результаты указывают на предпочтительность проведения диагностического нагружения по второй схеме.

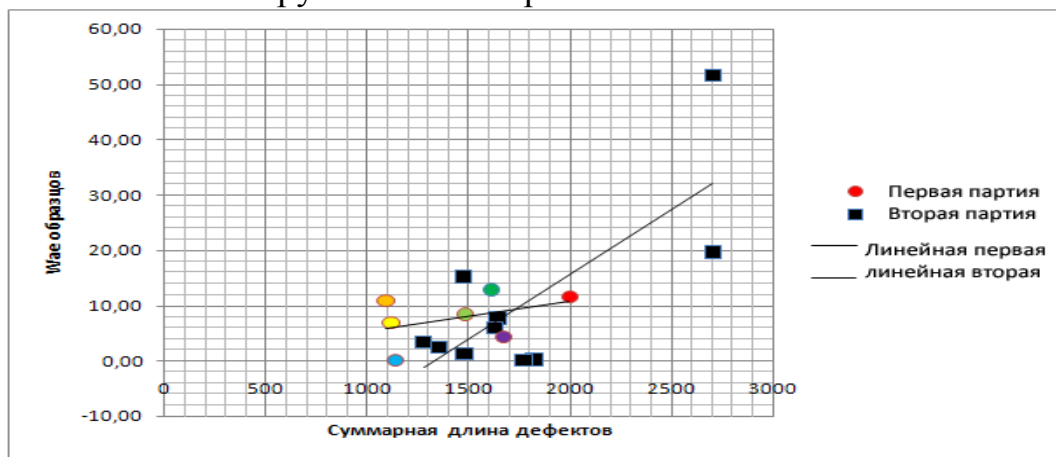


Рис. 8. График распределения суммарной длины дефектов по образцам и показателя W_{AE} образцов для обеих партий.

Для формулировки диагностического признака для стальных заготовок была обработана информация о параметрах АЭ годной заготовки, полученная в ходе промышленных экспериментов на НЛМК (Рис. 9.). Для испытанной технологической заготовки $W_{AE} = 11,163$, что соответствует полученным в ходе расчётов значениям, характерным для качественной заготовки. Полученное значение параметра W_{AE} предлагается считать соответствующим заготовке удовлетворительного качества, содержащей устранимые дефекты и базой для определения максимально допустимого значения $[W_{AE}]$.

Диагностический признак состояния пригодной для дальнейшей обработки заготовки выглядит следующим образом

$$W_{AE} < [W_{AE}]$$

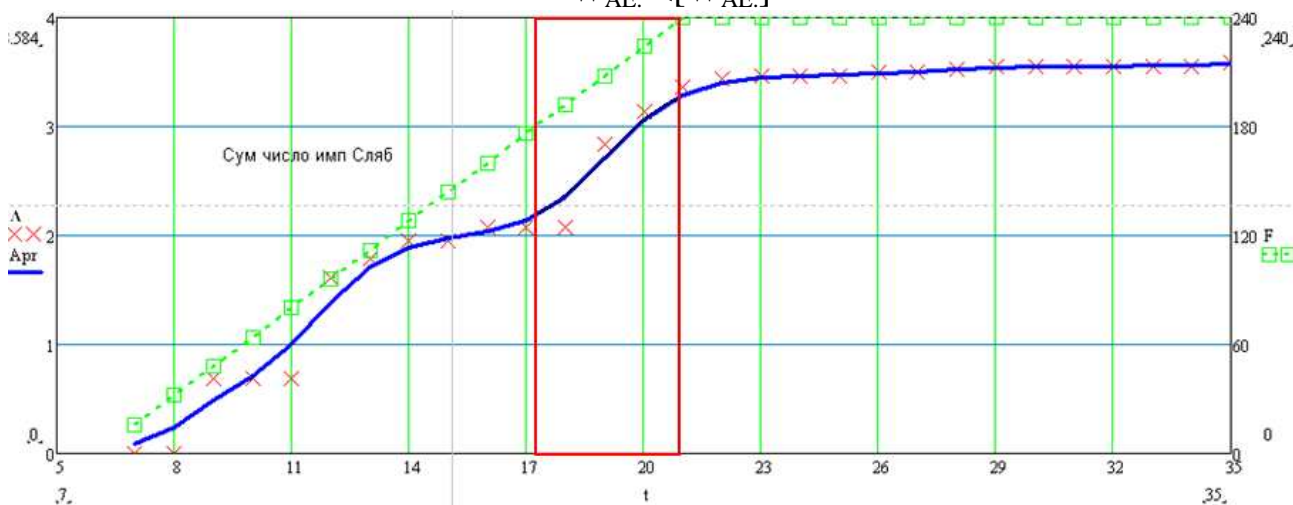


Рис. 9. Графики временных зависимостей логарифма суммарного числа сигналов для заготовки и роста значений напряжений.

С повышением значения параметра W_{AE} вероятность проявления дефектов в заготовке с перспективой их развития в процессе обработки увеличивается вплоть до необходимости отбраковки заготовки. Снижение значения указывает на меньшую дефектность материала заготовки. Уточнение пороговых значений $[W_{AE}]$ параметра для условий конкретного производства требует проведения установочных экспериментов.

В четвёртой главе приведены алгоритм проведения и особенности использования АЭ контроля в условиях производства.

Методика обеспечения работоспособности предполагает следующий Алгоритм проведения контроля качества технологических заготовок:

1. Подготовка технологических заготовок к проведению контроля включает в себя установку датчиков на остывшую заготовку с обеспечением условия акустического контакта между материалом заготовки и Преобразователя АЭ, и возможностью полного контроля всего объёма материала технологической заготовки. Количество и размещение датчиков определяется необходимостью локализации источников сигналов для обеспечения возможности устранения опасных дефектов.

2. Производится проверка акустического контакта при использовании имитатора источника сигналов.

3. После проведения подготовительных работ осуществляются непосредственные работы по контролю. Нагружение объекта производят посредством постепенного повышения нагрузки, приводящей к образованию максимальных эквивалентных напряжений в поперечном сечении слитка, значением по модулю превышающим 40% от предела текучести материала, но не превышающих 80% предела текучести.

4. В процессе нагружения заготовки производится регистрация сигналов акустической эмиссии.

5. Снятие нагрузки.

6. Отключение датчиков и снятие их.

7. Обработка полученных сигналов с формулировкой отчёта о прочностном состоянии технологических заготовок. По результатам сравнения полученных значений с критическими.

Описана технология подготовки, выбор количества датчиков, способ нагружения и установка для его осуществления в условиях технологического процесса в условиях промышленного производства. В зависимости от специфики производства, а соответственно и предъявляемых к технологии контроля требований, основные виды исполнения установки контроля можно разделить по следующим критериям:

Место внедрения в технологический процесс: установка находится в сталеплавильном цехе на выходе из участка непрерывного литья заготовок и осуществляет выходной контроль; установка находится на складе слябов, осуществляет контроль по мере прибытия технологических заготовок на склад, либо в процессе хранения, либо перед отправкой; установка находится в цехе горячей прокатки на линии подающего конвейера, осуществляет входной контроль заготовок непосредственно перед подачей в нагревательные печи.

Применение с оборудованием удаления дефектов: совместное или раздельное. При выборе той или иной схемы надо отталкиваться от условий производства конкретного предприятия. При этом в предприятиях с полым металлургическим циклом значительное внимание при выборе следует обратить на направленность предприятия. Так, к примеру, наиболее выгодным в условиях предприятия, в котором существенная доля производимых технологических заготовок отправляется на продажу, является второй вариант внедрения в технологический процесс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований сделаны следующие выводы:

- Перспективным направлением обеспечения работоспособности листовых элементов машиностроительных конструкций является контроль их качества на стадии изготовления. Основным показателем качества является связанный с работоспособностью показатель прочностного состояния, оценка которого возможно проводить на стадии изготовления полосы.

- Метод АЭ контроля является перспективным для применения с целью неразрушающего контроля прочностного состояния заготовок и прогнозирования дефектности листового металла.
- Разработана модель преобразования прочностного состояния заготовок, опирающаяся на микромеханическую модель разрушения гетерогенных материалов, и связывающая между собой параметры прочностного состояния заготовки и полученного из неё листа.
- Произведена постановка, получены и проанализированы результаты экспериментальных исследований, подтверждающие существование связи параметров прочностного состояния заготовок и готового листа.
- Сформулированы диагностический параметр и признак дефектации материала технологических заготовок.
- Разработана методика обеспечения работоспособности листовых элементов машиностроительных конструкций, основанная на акустико-эмиссионном контроле прочностного состояния технологических заготовок.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. "Контроль качества слитков методом акустической эмиссии" Лаврин В.Г., Носов В.В. 71-72с. XXXIX Неделя науки СПбГПУ : материалы международной научно-практической конференции. Ч.IV.-СПб.:Изд-во Политехн . ун-та, 2010.-292с.

2. Носов, В. В. Неразрушающий контроль качества заготовок для производства горячекатаной полосы методом акустической эмиссии [Текст] / В. В. Носов, А. П. Жильцов, В. Г. Лаврин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Наука и образование. – 2010. – № 4. – С. 170 – 174. – Библиогр.: с. 174.

3. Лаврин, В. Г. Исследование акустической эмиссии деформируемых отливок [Текст] / В. Г. Лаврин, В. В. Носов // XXXVIII Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции. Ч.IV. – 2009. - С.50 – 51. – Библиогр.: с. 50.

4. «Методика контроля качества сляба для прогнозирования дефектности горячекатаной полосы» В.Г.Лаврин, В.В.Носов. Современное машиностроение. Наука и образование. Материалы международной научной конференции. СПб.: изд-во Политехнического ун-та, 2009.

Пат.2404872 Российская Федерация, МКП В21В 38/00, G01N 29/14. Способ контроля сляба для производства горячекатаной полосы / Носов В.В. Лаврин В.Г., заявитель и патентообладатель ГОУВПО «СПбГПУ». – №2009127637/02. заявл. 17.07.2009, опубл. 27.11.2010, Бюл. №33.

Статья **«Неразрушающий контроль качества заготовок для производства горячекатаной полосы методом акустической эмиссии»** принята в печать редакцией ж. «Дефектоскопия» РАН.