

На правах рукописи

ВОЯЧЕК Татьяна Александровна

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ДЕТАЛЕЙ
С ГАЛЬВАНИЧЕСКИМИ ПОКРЫТИЯМИ**

Специальность 05.02.08 — Технология машиностроения

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

ПЕНЗА 2002

Работа выполнена в Пензенском государственном университете.

Научный руководитель — доктор технических наук, профессор **Смогунов В. В.**

Научный консультант — кандидат технических наук, доцент **Корнилаева Л. П.**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор **Власов П. А.**; доктор технических наук, профессор **Скрябин В. А.**

Ведущая организация — завод им. Фрунзе (ОАО «ЗИФ»).

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2002 года, в _____ часов на заседании диссертационного совета Д. 212.186.03 Пензенского государственного университета (440026, г. Пенза, ул. Красная, 40).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Пензенского государственного университета.

Автореферат разослан «_____» _____ 2002 года.

Ученый секретарь
совета д. т. н., профессор

В. О. Соколов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Гальваническое покрытие можно рассматривать как технологическую операцию, направленную на повышение надёжности и работоспособности деталей путём обеспечения рационального протекания процессов в поверхностных слоях деталей в процессе эксплуатации. В настоящее время разработана большая номенклатура гальванических покрытий, которые могут придавать поверхностям деталей машин различные физико-механические свойства, существенно отличающиеся от свойств основного материала детали и тем самым обеспечивать заданную коррозионную стойкость, износостойчивость, контактную жёсткость и т.д. деталей.

Соединение материала гальванического покрытия с материалом детали будет всегда осуществляться по случайной поверхности, возникающей в результате шероховатостей, которые имеет деталь. Поэтому однослойное покрытие будет состоять из слоя самого материала покрытия и гетерогенного слоя, состоящего в свою очередь из материала покрытия и материала шероховатости детали. Известно, что надёжность работы деталей с гальваническими покрытиями зависит от технологии обработки деталей до нанесения покрытия, технологии нанесения покрытия и технологии обработки деталей после его нанесения. Отслоение покрытия, его статическая и усталостная прочность зависит от технологии получения деталей с покрытием. Существующие в настоящее время модели напряжённо-деформированных состояний деталей с гальваническими покрытиями не учитывают особенности деформирования гетерогенного слоя покрытия, а анализ напряжённо-деформированного состояния производится только для слоя, состоящего из материала покрытия, предполагая идеальную границу контакта. Всё это не способствует реальной оценке несущей способности деталей с покрытиями и препятствует выбору оптимальных технологических решений на стадии проектирования технологического процесса, обеспечивающего прочность детали и покрытия. Поэтому исследование процесса деформирования гетерогенных слоёв деталей с покрытиями с целью выявления влияния технологических факторов на их напряжённо-деформированные состояния является необходимым.

Учёт технологии осаждения покрытия и технологии обработки деталей до и после его нанесения в критериях пластичности и прочности поверхностных слоёв деталей с гальваническими покрытиями является актуальным. Это позволит разработать, отсутствующий в данное время критерий выбора технологического процесса изготовления деталей, обеспечивающего прочность покрытия в процессе эксплуатации.

Существенным недостатком проектирования технологического процесса изготовления деталей с гальваническими покрытиями является отсутствие системного подхода к обеспечению несущей способности детали с покрытием. Разработка методики проектирования технологического процесса изготовления деталей с покрытиями, который обеспечивал бы их несущую способность, ликвидирует указанный недостаток.

Цель работы. Повышение надёжности и работоспособности машин и механизмов путём выбора на стадии проектирования рациональной технологии обработки деталей с гальваническими покрытиями.

Научная новизна. Основные научные результаты формулируются следующим образом:

- для исследования влияния технологии обработки деталей с гальваническими покрытиями на напряжённо-деформированные состояния поверхностных слоёв были разработаны методики расчёта эффективных модулей упругости, коэффициентов теплопроводности, линейного расширения и удельной теплоёмкости гетерогенного слоя. Установлено существенное влияние технологии обработки поверхности деталей до нанесения покрытия на величину и распределение эффективных модулей;

- разработаны модели напряжённого состояния гетерогенного слоя деталей с гальваническими покрытиями, учитывающие как технологию осаждения покрытия, так и технологию обработки до и после нанесения покрытия, позволяющие определять как средние напряжения по толщине гетерогенного слоя, так и напряжения в каждой фазе в отдельности при изотермическом и неизотермическом нагружении;

разработаны критерии пластичности и критерии статической и усталостной прочности деталей с гальваническими покрытиями,

учитывающие технологии осаждения и технологии обработки деталей до и после нанесения покрытия;

- установлено, что гальванические покрытия являются технологическими концентраторами напряжений, причём разрушение при различных модулях упругости материалов детали и покрытия как при изотермическом, так и неизотермическом нагружении начинается в гетерогенном слое;

- разработан критерий выбора технологического процесса изготовления деталей с гальваническими покрытиями, обеспечивающего их заданную прочность.

Практическая ценность. На основе предложенных моделей разработана методика проектирования технологических процессов, обеспечивающих заданную несущую способность деталей с гальваническими покрытиями. Разработан пакет прикладных программ математического моделирования напряжённо-деформированных состояний и несущей способности деталей с гальваническими покрытиями при статическом и циклическом нагружении с учётом действия температуры и технологии их получения.

Разработанная методика проектирования технологических процессов внедрена в производство группы хромированных деталей на АООТ ППО «Эра». Это позволило повысить несущую способность хромированных деталей типа валов в 1,5...1,8 раза. Кроме этого разработанная в диссертации методика прогнозирования прочности деталей с гальваническими покрытиями, учитывающая технологию нанесения покрытия и технологию обработки деталей до и после нанесения покрытия внедрена в учебный процесс Пензенского артиллерийского инженерного института.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на 5 - ой «Точность технологических и транспортных систем» (Пенза, ПДНТП, 1998г.), 6 - ой «Точность и надёжность технологических и транспортных систем» (Пенза, ПДНТП, 1999г.) и на 7 - ой «Комплексное обеспечение показателей качества транспортных и технологических машин» (Пенза, ПГУ, 2001г.) международных научно-технических конференциях, на научно-технических конференциях Пензенского государственного университета (1997г....2001г.).

Объём и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка использованной лите-

ратуры и приложения. Она изложена на 173 страницах, содержит 33 рисунка, 14 таблиц, список использованной литературы из 61 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, научная новизна, практическая ценность, апробация работы, изложена её структура.

В первой главе приведён анализ влияния технологии осаждения покрытия и технологии обработки детали до и после нанесения покрытия на их несущую способность.

Показан большой вклад в решение вопросов прочности деталей с гальваническими покрытиями работ учёных Института машиноведения им. А.А.Благонравова АН РФ, МГТУ им. Н.Э.Баумана, Московского химико-технологического университета и т. д. Данная работа является развитием исследований А.Т.Ваграмяна, М.Я.Поперека, И.В.Крагельского, Н.Б.Дёмкина, Э.В.Рыжова, А.Г.Суслова, В.А.Скрябина, П.А.Власова, Х.Д.Кристенсена и других учёных.

В главе приведён анализ влияния технологий нанесения и обработки деталей с гальваническими покрытиями на физико-механические свойства покрытий. Показывается, что среди свойств покрытия, в значительной степени влияющих на несущую способность деталей с покрытием следует отметить упругость, пластичность и прочность покрытия, твёрдость, остаточные напряжения, наводороживаемость основного металла и гальванического покрытия, сцепляемость покрытия. Анализируется влияние состава электролита, режимов осаждения и отпуска деталей до и после осаждения покрытия на перечисленные свойства покрытия. Анализ показал, что характеристики пластичности, прочности, микротвёрдость, остаточные напряжения значительно зависят от технологии нанесения покрытий и технологии обработки деталей до и после его нанесения. Водородная хрупкость покрытия значительно снижает его характеристики прочности. Двукратный отпуск существенно уменьшает водородную хрупкость покрытия.

Проведён анализ литературных данных по исследованию статической (однократной), малоцикловой и усталостной прочности

деталей с гальваническими покрытиями. Он показал, что покрытия значительно снижают циклическую прочность деталей (до двух раз) и пластические свойства деталей, но при этом статическая прочность деталей остаётся без изменений. Разрушение деталей с покрытиями при всех видах нагружений начинается с разрушения самого покрытия. Циклическая прочность деталей зависит от технологии нанесения покрытия и технологии обработки деталей как до нанесения покрытия, так и после.

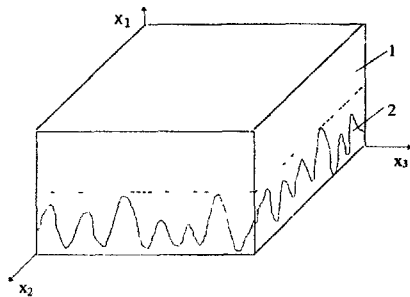


Рис 1 Фрагмент поверхностного слоя детали с покрытием

1 - однородный и изотропный слой материала покрытия, 2 - гетерогенный слой, состоящий из шероховатостей детали, впадины которых заполнены материалом покрытия

Проведён анализ существующих моделей напряжённо-деформированных состояний поверхностных слоёв деталей с гальваническими покрытиями. Этот анализ показал, что использование этих моделей для исследования напряжённо-деформированных состояний поверхностных слоёв деталей с покрытиями невозможно. Существующие модели не позволяют выявить распределение средних напряжений по толщине гетерогенного слоя покрытия. Кроме этого, они не позволяют определять напряжения в каждой отдельно взятой фазе гетерогенного слоя и тем самым определить критериальные уравнения процесса деформирования деталей с покрытием.

На основании литературных данных по технологическому обеспечению несущей способности деталей с гальваническими покрытиями и в соответствии с целью работы определены следующие задачи исследования:

- исследовать влияние технологии получения деталей с гальваническими покрытиями на упругие и теплофизические параметры поверхностных слоёв деталей с покрытиями;

- исследовать влияние технологий получения деталей с гальваническими покрытиями на их напряжённо-деформированное состояние при статическом изотермическом и неизотермическом нагружении в процессе эксплуатации;

- разработать критерии пластичности, критерии статической и усталостной прочности деталей с гальваническими покрытиями, учитывающие технологии осаждения и технологии обработки деталей до и после нанесения покрытия;

- разработать критерий выбора технологического процесса изготовления деталей с гальваническим покрытием, обеспечивающего требуемую прочность детали;

- разработать методику проектирования технологических процессов, обеспечивающих несущую способность деталей с гальваническими покрытиями.

Во второй главе представлены методики расчёта упругих и теплофизических характеристик поверхностных слоёв деталей с покрытиями. Расчётная схема приведена на рис. 1.

Для гетерогенного слоя, изображённого на рис. 1, принималось, что случайная поверхность контакта подчиняется закону распределения Грама-Шарлье и это распределение является однородным и изотропным. Это позволяет считать, что гетерогенный слой состоит из трансверсально изотропного материала с осью симметрии свойств x_1 .

Для определения эффективных модулей упругости C_{ij} , коэффициентов теплопроводности λ_{ij} , коэффициентов линейного расширения α_{ij} и удельной теплоёмкости гетерогенного слоя (рис. 1) на расстоянии x_1 от координатной плоскости x_2Ox_3 выделялся слой толщиной dx_1 . Этот слой можно рассматривать как гетерогенную среду с цилиндрическими включениями, свойства которой имеют ось симметрии, направленную вдоль оси цилиндров, т.е. вдоль оси x_1 . В качестве примера приведём два технических модуля, а именно, модуль Юнга E_{11} и модуль сдвига G_{12} , которые имеют вид:

$$E_{11} = CE_1 + (1 - C)E_2 + \frac{4C(1 - C)(\mu_1 - \mu_2)^2 G_2}{(1 - C)\eta_3 + C\eta_4 + 1}; \quad (1)$$

$$G_{12} = \frac{G_1(1 + C) + G_2(1 - C)}{G_1(1 - C) + G_2(1 + C)} G_2,$$

где $\eta_3 = G_2 / (K_1 + \frac{1}{3}G_1)$; $\eta_4 = G_2 / (K_2 + \frac{1}{3}G_2)$; E_1, G_1, μ_1, K_1 - модули

Юнга, сдвига, коэффициенты Пуассона, объёмные модули упругости при плоском деформированном состоянии для первого ($i = 1$) и второ-

го ($i=2$) материалов системы соответственно; S - площадь сечения, перпендикулярного оси x_1 , занятая первым материалом.

В формулах всех эффективных упругих и теплофизических характеристик (как, например в (2)) присутствует параметр S . Этот параметр можно трактовать как площадь опорной поверхности на уровне x_1 . Было получено выражение опорной поверхности для закона Грама-Шарлье, которое имеет вид:

$$Et(x_1) = 1 - \Phi' \left(\frac{x_1}{\sqrt{K(0)}} \right) + \left\{ \frac{A}{6} \left[\left(\frac{x_1}{\sqrt{K(0)}} \right)^2 - 1 \right] - \frac{E}{24} \left[\left(\frac{x_1}{\sqrt{K(0)}} \right)^3 - 3 \left(\frac{x_1}{\sqrt{K(0)}} \right) \right] \right\} \varphi \left(\frac{x_1}{\sqrt{K(0)}} \right) - \left\{ \frac{A}{6} \left[\left(\frac{R_{\max} - R_p}{\sqrt{K(0)}} \right)^2 - 1 \right] + \frac{E}{24} \left[\left(\frac{R_{\max} - R_p}{\sqrt{K(0)}} \right)^3 - 3 \left(\frac{R_{\max} - R_p}{\sqrt{K(0)}} \right) \right] \right\} \varphi \left(- \frac{R_{\max} - R_p}{\sqrt{K(0)}} \right), \quad (2)$$

где

$$\Phi'(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{R_p - R_{\max}}{\sqrt{K(0)}}}^z e^{-\frac{y^2}{2}} dy; \quad \varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}};$$

$$A = 6\sqrt{2\pi}(0,5 - t_m); \quad E = 24 \left(1 - \frac{\sqrt{2\pi}}{2k_q} \right); \quad k_q = \frac{\sqrt{K(0)}}{R'a};$$

$K(0)$ - корреляционная функция; $R'a$ - среднее арифметическое отклонение профиля; t_m - значение опорной площади на уровне базовой плоскости.

Исследования показали, что распределение эффективных модулей упругости, коэффициентов теплопроводности, линейного расширения и удельной теплоёмкости по толщине гетерогенного слоя существенно зависит от распределения материала в шероховатом слое детали, а следовательно от методов обработки детали перед нанесением покрытия.

В третьей главе приведены модели напряжённно-деформированных состояний поверхностных слоёв деталей с гальваническими покрытиями. Для определения средних напряжений по толщине гетерогенного слоя использовалась трансверсально изотропная (x_1 - ось симметрии свойств) и неоднородная по толщине (вдоль оси x_1) модель твёрдого деформированного тела. Результаты исследований показали, что средние напряжения в гетерогенном слое изменяются от напряжений в однородном и изотропном материале детали до напряжений в однородном и изотропном слое покрытия при равенстве деформаций. Причём, величина этого изменения существенно зависит от отношений модулей упругости и коэффициентов линейного расширения, а также от нагрева или охлаждения детали. Так например, при контакте стали с медью с увеличением нагрева детали изменение напряжений по толщине гетерогенного слоя увеличивается, а с охлаждением - наоборот уменьшается.

Для исследования напряжённного состояния фаз гетерогенного слоя деталей с покрытиями были разработаны две модели. Первая модель базируется на полидисперсном представлении твёрдой среды с цилиндрическими включениями, представительным элементом которой является составной цилиндр, который находится в бесконечной плоскости (ось цилиндра перпендикулярна плоскости), состоящей из эквивалентного гомогенного твёрдого тела. Данная плоскость на бесконечности деформируется вдоль осей x_2 и x_3 (рис. 1) соответственно на ϵ_1 и ϵ_2 . Для определения напряжённно-деформированного состояния тел этой модели было использовано решение Мичела для цилиндра, испытывающего плосконапряжённное состояние. Постоянные интегрирования определялись из условий непрерывности напряжений и перемещений на границе раздела фаз.

Описанная выше модель не позволяет оценить напряжённно-деформированное состояние в зоне максимального выступа шероховатости и на дне самой глубокой впадины шероховатой поверхности детали. С целью восполнения данного недостатка полидисперсной модели, была рассмотрена вторая модель - модель растяжения шарового включения в бесконечном твёрдом деформируемом теле. Выбор этой модели объясняется тем, что как вершина неровностей, так и впадина - удовлетворительно описываются шаровой поверхностью.

Исследования напряжённого состояния по этим моделям показали, что при одинаковом одноосном растяжении на величину ϵ_1 бесконечного слоя в первой модели и упругого бесконечного пространства второй модели, величина растягивающей деформации ϵ_{1T} , при которой возникнут пластические деформации фаз, согласно критерию Мизеса, по первой модели будет в 1,5 раза меньше, чем у второй. Причём, по полидисперсной модели пластические деформации как при изотермическом нагружении, так и при действии только температуры возникнут в гетерогенном слое на границе раздела фаз. Если модуль упругости первого рода покрытия и его предел текучести меньше аналогичных показателей у материала детали, то при изотермическом нагружении пластические деформации возникнут в материале покрытия на границе раздела фаз в зоне, прилежащей к впадинам шероховатого слоя детали, а при действии только температуры - на границе раздела фаз в зоне, прилежащей к вершинам шероховатостей.

В четвёртой главе приведены критерии прочности поверхностных слоёв деталей с гальваническими покрытиями при статическом нагружении и критерий усталостной прочности стальных деталей с хромовым покрытием.

За основу критерия разрушения гальванических покрытий был взят критерий прочности Писаренко-Лебедева. Известно, что он является обобщением силовых критериев прочности для хрупких и пластичных материалов, который отражает вид напряжённого состояния, анизотропию свойств и условия возникновения микронесплошности структурно неоднородных материалов.

В результате исследований было установлено, что разрушение поверхностных слоёв деталей с гальваническими покрытиями начнётся там же, где и пластическая деформация, а сам критерий Писаренко-Лебедева с учётом остаточных напряжений будет иметь вид:

$$\chi \sqrt{(\sigma'_{r2} + \sigma_{ост})^2 - (\sigma'_{r2} + \sigma_{ост})(\sigma'_{\varphi 2} + \sigma_{ост}) + (\sigma'_{\varphi 2} + \sigma_{ост})^2 + 3(\sigma'_{r\varphi 2})^2} + (1 - \chi) \left[\frac{\sigma'_{r2} + \sigma'_{\varphi 2} + 2\sigma_{ост}}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma'_{r2} - \sigma'_{\varphi 2})^2 + 4(\sigma'_{r\varphi 2})^2} \right] \leq \sigma_{B2}, \quad (3)$$

где σ'_{r2} , $\sigma'_{\varphi 2}$, $\sigma'_{r\varphi 2}$ - радиальные, окружные и касательные напряжения во внешнем цилиндре, определяемые из решения полидисперсной задачи с цилиндрическими включениями на границе раздела

фаз от действия сил; $\sigma_{ост}$ - остаточные технологические напряжения; $\chi = (\chi_T + \chi_B)/2$; $\chi_T = \sigma_{ТР} / \sigma_{ТС}$; $\chi_B = \sigma_{ВР} / \sigma_{ТР}$; $\sigma_{ТР}$, $\sigma_{ТС}$ - пределы текучести на растяжение и сжатие материала покрытия; $\sigma_{ВР}$, $\sigma_{ВС}$ - пределы прочности на растяжение и сжатие материала покрытия.

В работе экспериментально доказывается, что для конструкционных качественных и легированных сталей с хромовым покрытием, осаждаемым из типового электролита (хромовый ангидрид 250г/л, серная кислота 2,5г/л, температура - 50°C, катодная плотность тока - 50 А/дм²) предел выносливости изменяется всего в 1,13 раза при изменении предела прочности стали в 2 раза. Это даёт право утверждать, что именно хромовое покрытие для сталей с высокими пределами прочности определяет усталостную прочность деталей. Поэтому в работе вводится понятие предела выносливости хромового покрытия $(\sigma_{-1})_{хр}$ и величину предела выносливости детали предлагается определять как

$$(\sigma_{-1})_д = (\sigma_{-1})_{0,2хр} K_h K_T, \quad (4)$$

где $(\sigma_{-1})_{0,2хр} = 334$ МПа - предел выносливости хромового покрытия толщиной 0,2мм; $K_h = 1 \dots 1,6$ - коэффициент, учитывающий толщину слоя хрома; $K_T = 1 \dots 2,1$ - коэффициент, учитывающий технологию обработки до и после осаждения хрома. При кручении

$$(\tau_{-1})_д = (\tau_{-1})_{0,2хр} K_h K_T, \quad (5)$$

где $(\tau_{-1})_{0,2хр} = 183$ МПа.

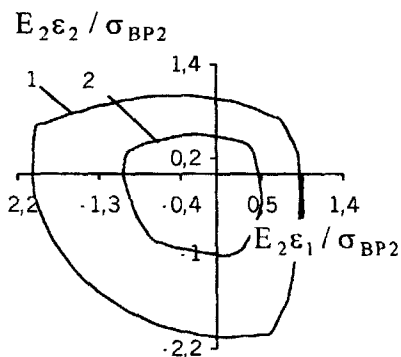


Рис 2 Область допустимых значений деформаций для гальванического покрытия при $\sigma_{ВР2}/\sigma_{ВР1} = 0,5$, $\mu_1 = \mu_2 = 0,3$
1 - $E_2/E_1 = 1$, 2 - $E_2/E_1 = 0,5$

Экспериментальное сравнение предложенной методики определения пределов выносливости детали с хромовым покрытием показало, что расчёт по формуле (4) даёт погрешность в 4%, а расчёт по формуле (6) - 8%. Таким образом, предложенная методика определения пределов выносливости стальных деталей с хромовым покрытием позволяет распространить имеющиеся

экспериментальные данные на всю номенклатуру конструктивных качественных и легированных сталей.

Условие сопротивления усталости имеет вид:

$$\sigma_{\text{эква}} + \Psi_{\text{сд}} \sigma_{\text{эква м}} = (\sigma_{-1})_{\text{д}}, \quad (6)$$

где $\sigma_{\text{эква}} = \sigma_{\text{ia}}$ и $\sigma_{\text{эква м}} = \sigma_{\text{1m}}$ - эквивалентные переменные и постоянные напряжения, соответственно равные интенсивности напряжений и наибольшему постоянному главному напряжению; $\Psi_{\text{сд}} = \Psi_{\sigma} K_h K_T$ - коэффициент влияния постоянных напряжений для детали; Ψ_{σ} - ко-

эффициент, характеризующий чувствительность материала к асимметрии цикла, который для всех циклов с растягивающими средними напряжениями может быть определён по приближённой формуле $\Psi_{\sigma} \approx \sigma_{-1} / \sigma_B$.

Разработанные критерии статической и многоцикловой прочности деталей с гальваническими покрытиями легли в основу критерия выбора технологического процесса, который обеспечивал бы заданную несущую способность деталей и покрытия. Технологический процесс обеспечивает заданную несущую способность деталей с гальваническим покрытием, если точки с координатами (ϵ_1, ϵ_2) ($i=1, 2, \dots$) (ϵ_1, ϵ_2 - главные деформации), соответствующие деформируемому состоянию всех точек поверхностных слоёв детали с покрытием расположены внутри области допустимых значений деформаций ϵ_1, ϵ_2 . Область допустимых значений деформаций ϵ_1, ϵ_2 зависит от технологии осаждения покрытия и технологии обработки до и после нанесения покрытия и определяется условиями прочности поверхностных слоёв деталей с гальваническими покрытиями при статическом (3) и многоцикловом нагружении (6). Примеры этих областей приведены на рис.2, и рис. 3. Из этих рисунков видно, что форма области, её размеры, расположение её по отношению к началу координат зависят

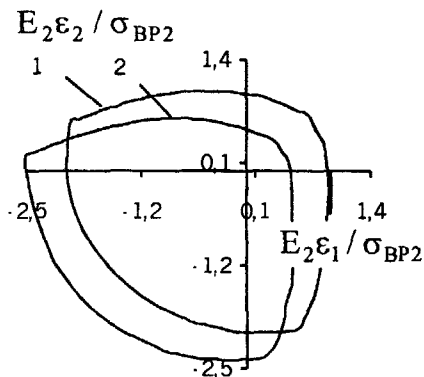


Рис 3 Область допустимых значений деформаций для гальванического покрытия при

$$E_2/E_1=1, \sigma_{\text{ср}2}/\sigma_{\text{ср}1}=0,5, \mu_1=\mu_2=0,3$$

$$1 - \sigma_{\text{ост}}=0, 2 - \sigma_{\text{ост}}=\sigma_{\text{ср}2}/2$$

от отношения модулей упругости первого рода материалов детали и покрытия, от соотношения пределов прочности на сжатие и растяжения материала покрытия, остаточных технологических напряжений и предела прочности материала покрытия.

В пятой главе на базе проведённых в работе исследований разработана технологическая последовательность изготовления и восстановления деталей с гальваническими покрытиями. Она разработана в зависимости от характера силового воздействия для трёх групп деталей: детали, работающие при длительных статических или повторно статических нагрузках; детали, работающие при динамических нагрузках; детали, работающие при сравнительно небольших нагрузках любого характера, как правило на износ. Кроме этого в главе приведена методика проектирования технологического процесса изготовления деталей с гальваническими покрытиями, обеспечивающего их несущую способность в зависимости от характера силового воздействия. Данная методика включает в себя выбор финишных операций и термической обработки деталей перед нанесением покрытия, выбор технологии нанесения покрытия и выбор технологических операций после нанесения покрытия.

Основные этапы проектирования технологического процесса при статических нагрузках и невысоких нагрузках любого вида следующие:

1. Определение точек (количество точек равно n) на поверхностях деталей и $\varepsilon_{1i}, \varepsilon_{2i}$ ($i=1, 2, \dots, n$) в них, которые в процессе эксплуатации могут привести к разрушению покрытия.

2. Выбор финишных операций и термообработки деталей перед нанесением покрытия. На этом этапе необходимо выбирать режимы механообработки такими, чтобы обеспечить величину рациональной шероховатости детали (в зависимости от вида покрытий $Ra=(0,16 \dots 2,5)$ мкм) т. к. от неё зависит шероховатость покрытия и его сцепляемость с основой. Поэтому рекомендуется чистовое обтачивание $Ra=(0,8 \dots 2,5)$ мкм, чистовое шлифование $Ra=(0,2 \dots 1,25)$ мкм. Для плоских поверхностей - чистовое шлифование $Ra=(0,32 \dots 1,6)$ мкм. Величина наклёпа и остаточные напряжения должны быть минимальны для того, чтобы уменьшить наводороживаемость поверхности детали и улучшить сцепляемость покрытия с деталью. Для уменьшения

наводороживаемости, остаточных напряжений и наклёпа после механообработки рекомендуется применять низкий отпуск.

3. Выбор материала покрытия и выбор технологии осаждения покрытия. При выборе материала покрытия необходимо стремиться, чтобы величина модулей упругости деталей и покрытия как можно меньше отличались друг от друга. Этим обеспечивается минимум концентрации напряжений в покрытии. Основное внимание при выборе режимов нанесения покрытия необходимо обратить на создание мелкодисперсной

высокопрочной структуры покрытия с минимальными растягивающими напряжениями и с минимальной наводороживаемостью покрытия и детали. Это может быть достигнуто при выборе состава электролита, дозировкой количества примесей в электролитах, повышением температуры электролита и подбором оптимальной величины плотности тока.

4. Выбор обработки деталей после нанесения покрытия. Для снятия остаточных напряжений и уменьшения наводороживаемости детали и покрытия целесообразно использовать низкий отпуск. Для покрытий из электролитического хрома и стали, испытывающих небольшие нагрузки любого вида при трении применяют механическую обработку для обеспечения точности размеров и формы, а также шероховатости поверхности. В единичном и мелкосерийном производстве припуски выбирают в зависимости от толщины покрытия и вида обработки. Так припуск на шлифование и хонингование покрытия из электролитического хрома и стали следует назначать в пределах 15...30% от толщины слоя. Припуск на хонингование и притирку после шлифования назначают 0,01...0,03мм на диаметр в зависимости от

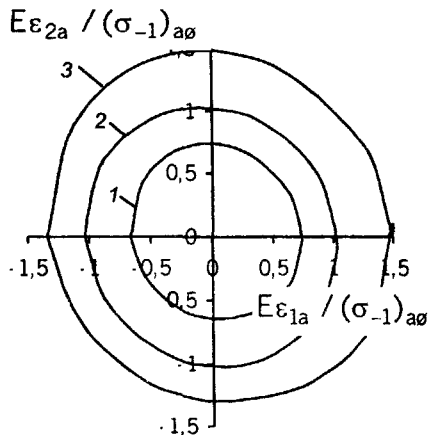


Рис 4 Области допустимых значений деформаций
1 - шлифование, хромирование, 2 - шлифование без покрытия, 3 - шлифование, обкатывание шариками, отпуск 2,5ч (200 250°C), хромирование, отпуск 2,5ч (200 250°C)

точности шлифованной поверхности. Рекомендованы режимы обработки при наружном шлифовании покрытий из хрома, которые с одной стороны обеспечивают необходимую шероховатость хрома, а с другой стороны после обработки будут отсутствовать прижоги поверхности и трещины в поверхностном слое детали под покрытием. Кроме этого приведены режимы хонингования и поверхностного пластического деформирования покрытий из хрома, обеспечивающие необходимую шероховатость покрытия и высокую производительность процесса.

5. Построение области допустимых значений деформаций для выбранного технологического процесса и сопоставление её с точками, координаты которых равны $\varepsilon_{1i}, \varepsilon_{2i}$ ($i=1, 2, \dots, n$) в опасных точках поверхности деталей.

6. Заключение об эффективности технологического процесса (все точки с координатами $\varepsilon_{1i}, \varepsilon_{2i}$ ($i=1, 2, \dots, n$) должны находиться внутри области допустимых значений деформаций).

Аналогичная методика проектирования разработана для деталей, работающих при динамической нагрузке. В данной методике в основном рассматриваются детали с покрытием хрома, как типичного представителя хрупких покрытий. Основное отличие её от приведённой выше методики состоит в целесообразности применения технологий поверхностного пластического деформирования деталей до и после нанесения покрытия, использование приведённого выше электролита на основе хромового ангидрида с температурой 50°C и плотностью тока 50 А/дм^2 , а также нанесения хрома толщиной не более $0,04 \dots 0,05 \text{ мм}$.

Пример. Необходимо спроектировать технологический процесс изготовления хромированного вала из стали 40Х, испытывающего симметричные циклические нагружения, который имел бы несущую способность не хуже, чем шлифованный вал без покрытия.

Принималось, что модули Юнга у материала стали и хрома одинаковы, а $(\sigma_{-1})_{\text{дш}}$ - предел усталостной прочности шлифованного вала без покрытия. Толщина покрытия равна $0,05 \text{ мм}$. Рассматривались три технологических процесса: шлифование без покрытия; шлифование и хромирование; шлифование, обкатывание шариками, отпуск $2,5 \text{ ч}$. ($200 \dots 250$) $^\circ\text{C}$, хромирование, отпуск $2,5 \text{ ч}$. ($200 \dots 250$) $^\circ$. Из рис. 4

видно, что несущая способность вала, изготовленного по третьему технологическому процессу выше, чем у вала без покрытия.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Основные научные и практические результаты формулируются следующим образом.

1. Анализ литературных данных и опыта промышленности показал, что несущая способность деталей с гальваническими покрытиями при статическом и многоцикловом нагружении существенно зависит от технологии нанесения покрытия и обработки деталей до и после нанесения покрытия. Технологическими приемами можно изменять статическую и усталостную прочность деталей по крайней мере в 1,5...2 раза.

2. Разработаны и исследованы модели теплофизических и деформационных процессов в поверхностных слоях деталей с гальваническими покрытиями, учитывающие особенности как технологии осаждения покрытия, так и технологии обработки деталей до и после нанесения покрытия. Эти модели позволили в рамках механики композитов разработать методики определения эффективных модулей упругости и эффективных теплофизических характеристик для гетерогенного слоя, состоящего из двух материалов (материала покрытия и материала детали), контактирующих по случайной поверхности в пределах всей толщины слоя.

3. Установлено, что распределение эффективных модулей упругости, коэффициентов теплопроводности, линейного расширения и удельной теплоёмкости по толщине гетерогенного слоя существенно зависит от долевого распределения материалов детали и покрытия в гетерогенном слое, а следовательно от методов обработки детали перед нанесением покрытия.

4. Разработаны и исследованы модели статического деформирования поверхностных слоёв деталей с гальваническими покрытиями в процессе эксплуатации. Установлено, что средние напряжения по толщине гетерогенного слоя изменяются в несколько раз (в соединении сталь-медь – в 2 раза) и характер изменения зависит от долевого распределения материалов детали и покрытия в гетерогенном слое, а следовательно от методов обработки детали перед нанесением покрытия.

Доказано, что при различных модулях упругости первого рода у материала детали и покрытия, гальваническое покрытие является концентратором напряжений, причём коэффициент концентрации пропорционален отношению наибольшего модуля упругости к наименьшему и не зависит от геометрии шероховатостей детали.

5. Получены критерии пластичности и прочности поверхностных слоёв детали с гальваническим покрытием при статическом нагружении в процессе эксплуатации с учётом особенностей технологий нанесения покрытия и обработки детали до и после покрытия. Установлено, что разрушение поверхностных слоёв деталей с гальваническими покрытиями при различных модулях упругости покрытия и детали начинается в гетерогенном слое.

6. Разработан критерий усталостной прочности стальных деталей с гальваническим покрытием хрома, учитывающий технологию нанесения хрома и обработку деталей до и после нанесения покрытия. Предложенная методика определения предела усталостной прочности стальной детали с хромовым покрытием позволяет распространить результаты экспериментов, полученных для одной марки стали на другие при сохранении технологии нанесения хрома. Экспериментальное сравнение показало удовлетворительную точность критерия (расхождение с экспериментом менее 10%).

7. На основании разработанных критериальных соотношений прочности предложен критерий выбора технологического процесса изготовления деталей с гальваническими покрытиями, обеспечивающего заданную их прочность.

8. Разработана методика проектирования технологического процесса изготовления деталей с гальваническими покрытиями, обеспечивающего их заданную несущую способность. Данная методика внедрена на АООТ ППО «Эра». Часть данной методики, а именно, прогнозирование прочности деталей с гальваническими покрытиями, внедрена в учебный процесс Пензенского артиллерийского инженерного института.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Воячек Т.А.. Технологическое обеспечение жёсткости контактной системы, состоящей из двух материалов, сопряжённых

по случайной поверхности /Т.А.Воячек, А.И.Воячек //Новые промышленные технологии. - М., 1997. - №3. - С. 29-36.

2. Воячек Т.А. Критерии предельных состояний при деформировании контактной системы, состоящей из двух материалов сопряжённых по случайной поверхности/ Т.А.Воячек, А.И.Воячек //Технологии и системы обработки информации и управления: Сб. научн. тр. - Пенза: Пенз. гос. ун-т. 1998. - Вып. 1 - С. 88-94.

3. Воячек Т.А. Моделирование напряжённого состояния фаз гетерогенного слоя деталей с покрытиями/Т.А.Воячек, В.В.Смогунов, В.Ю.Зайцев //Технологии и системы обработки информации и управления: Сб. науч. тр.-Пенза: Пенз. гос. ун-т. 1999. - Вып. 3 - С. 44-49.

4. Воячек Т.А. Критерии пластичности для поверхностных слоёв деталей с гальваническими покрытиями //Точность и надёжность технологических и транспортных систем: Сб. науч. тр. - Пенза: ПДНТП. 1999. - С. 156.

5. Воячек Т.А. Определение напряжённого состояния поверхностных слоёв деталей с покрытиями при тензометрировании //Датчики систем измерения, контроля и управления: Межвуз, сб. науч. тр.-Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та. 2000. - Вып. 20. - С. 35-36.

6. Воячек Т.А. Технологическое обеспечение усталостной прочности деталей с покрытием хрома //Комплексное обеспечение показателей качества транспортных и технологических машин: Сб. науч. тр. - Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та. 2001. - С. 411-413.

7. Воячек Т.А. Методика системного анализа технологического обеспечения несущей способности деталей с гальваническими покрытиями/Т.А.Воячек, В.В.Смогунов, Л.П.Корнилаева //Системный анализ, управление и обработка информации: Сб. науч. тр.-Пенза: Пенз. гос. ун-т. 2001.-Вып. 9. - С. 32-33.

Воячек Татьяна Александровна

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ДЕТАЛЕЙ
С ГАЛЬВАНИЧЕСКИМИ ПОКРЫТИЯМИ**

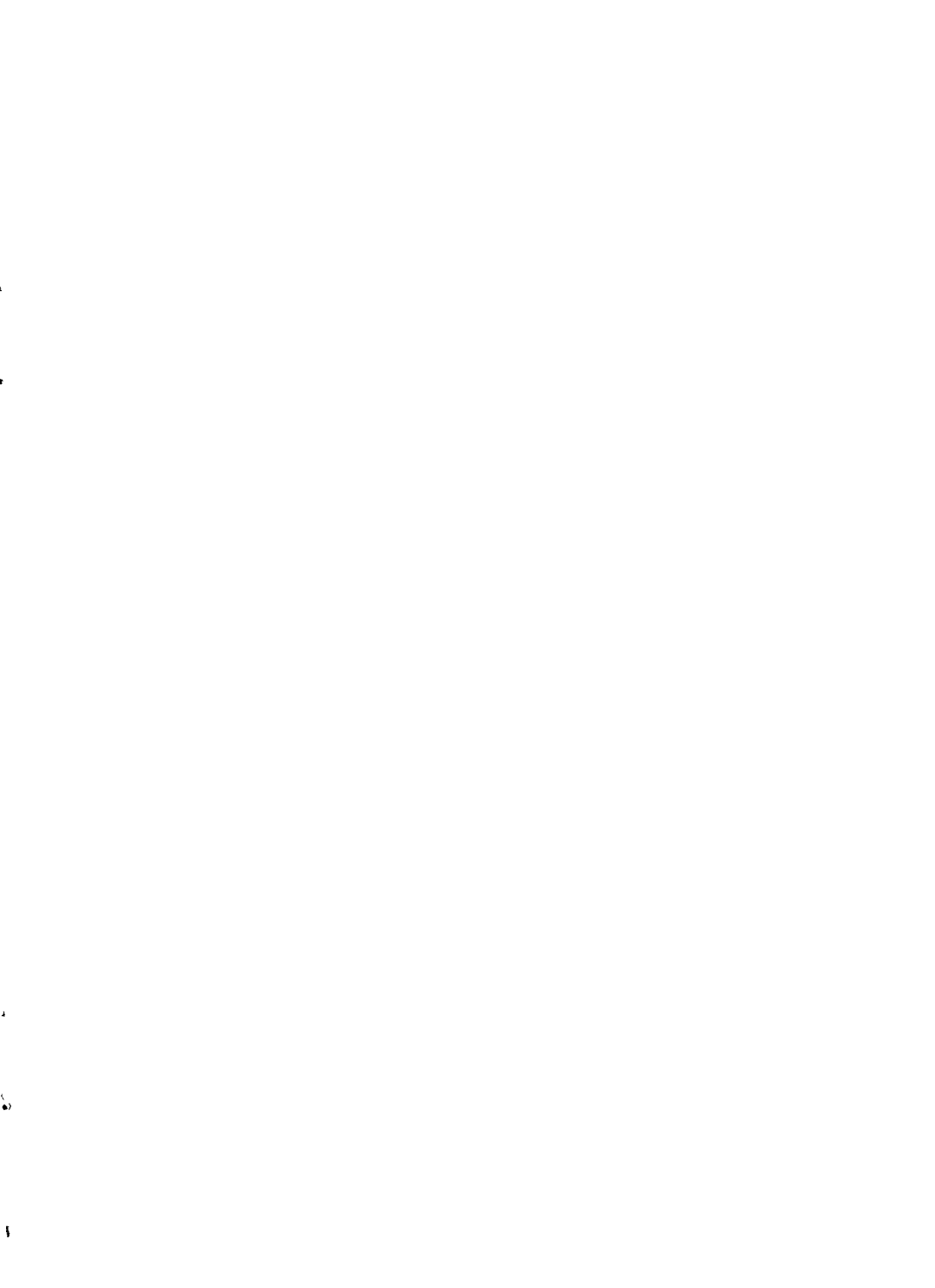
Специальность 05.02.08 — Технология машиностроения

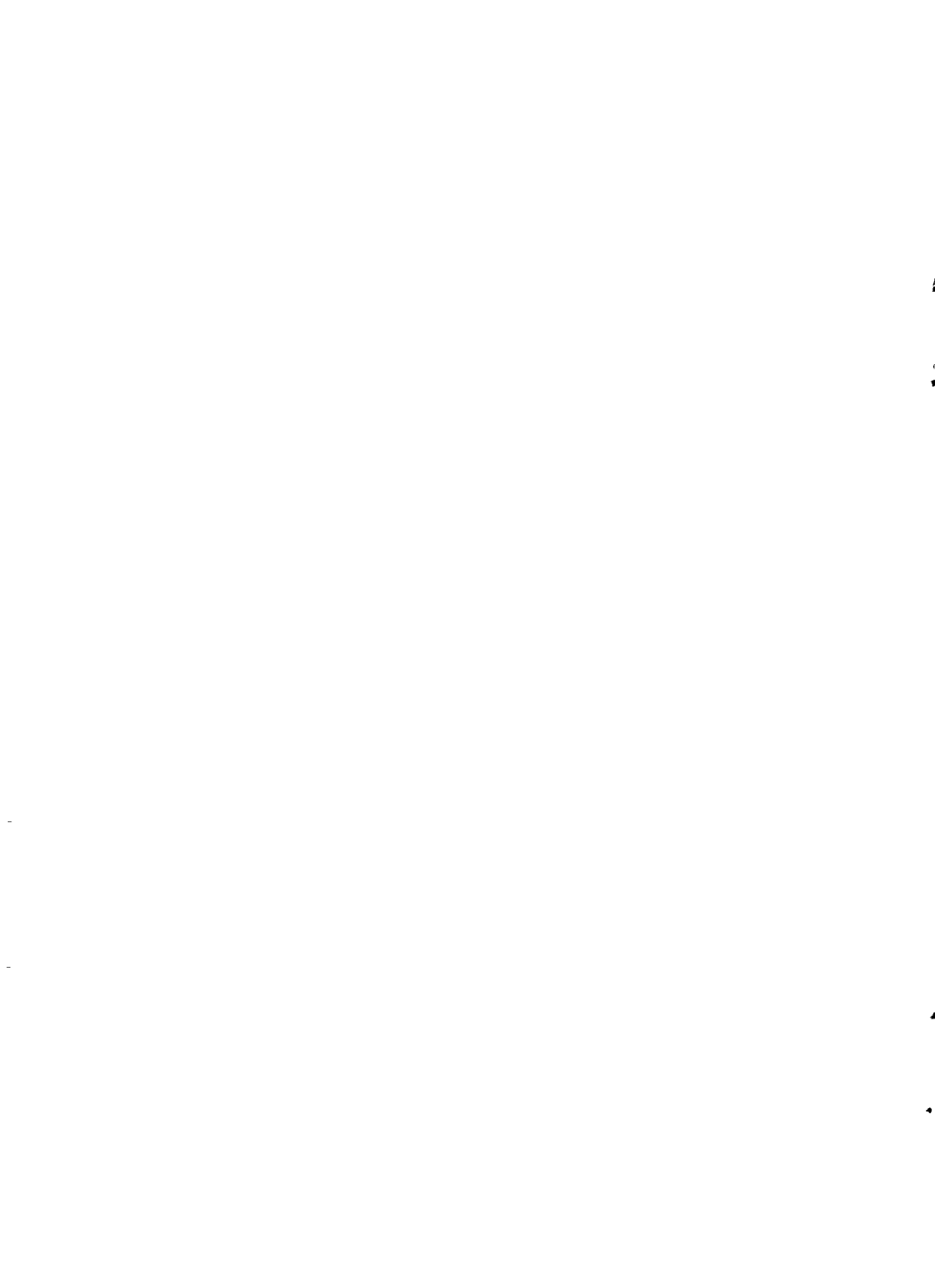
Сдано в производство 10.04.02. Формат 60x84¹/16.

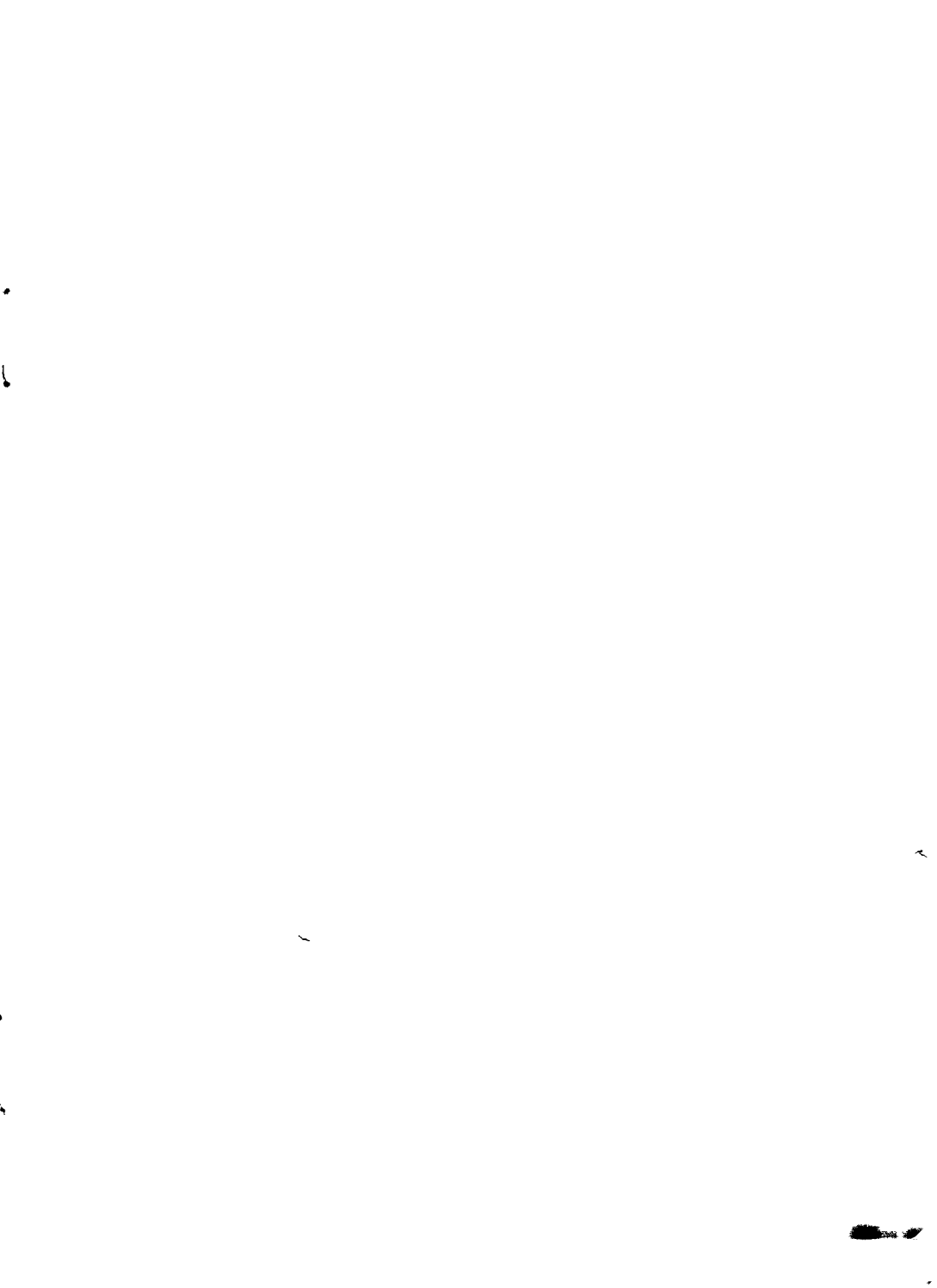
Бумага писчая. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,0.

Заказ 233. Тираж 100.

Типография издательства Пензенского государственного
университета. 440026, Пенза, Красная, 40.







2002-A

11766

№ 11766