



За счет дополнительно введенной в соединение детали сферической формы позволяет увеличивать местную подвижность кинематической пары «поршень-шатун» КШМ, снижая действие неблагоприятных факторов, возникающих в результате рабочего процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриевский, А.В. Автомобильные бензиновые двигатели. – М.: АСТ, 2003. – 128 с.
2. Левитский Н.И. Теория механизмов и машин. - М.: Наука, 1990. – 592 с.
3. Кривошипно-шатунный механизм / Патент України № 104009 від 25.12.2013 бюл. №24 // Бас К.М., Ванжа Г.К., Зіборов К.А., Кривда В.А.
4. Аршинов В.Д., Зорин В.К., Созинов Г.И Ремонт двигателей ЯМЗ-240, ЯМЗ-240Н, ЯМЗ-240Б. – М.: Транспорт, 1977. – 310 с.
5. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики. – М.: Высшая школа, 1986. – 416 с.
6. Колчин А.И., Демидов В.П. Расчет автомобильных и тракторных двигателей. – М.: Высшая школа, 2008. – 496 с.

УДК 621.787:669.182.33

КОМПЛЕКСНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ТЯЖЕЛОАГРУЖЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

С.А. Пахомова, кандидат технических наук, доцент кафедры Материаловедения Московский Государственный Технический Университет им. Н. Э. Баумана, Россия, e-mail: vladisl-2013@yandex.ru

А.С. Помельникова, доктор технических наук, профессор кафедры Материаловедения, Московский Государственный Технический Университет им. Н. Э. Баумана, Россия, e-mail: mgtu2013@yandex.ru

Аннотация. В работе проведено исследование режимов деформационного упрочнения поверхностей зубчатых колес из высокопрочных сталей с целью повышения их работоспособности и надежности. Исследованы закономерности изменения характеристик качества цементованного слоя, тонкой структуры его фаз и их взаимосвязь с контактной выносливостью.

Ключевые слова: высокопрочная сталь, цементация, деформационное упрочнение, дробиударная обработка, контактная выносливость.

INTEGRATED HARDENING OF THE HEAVILY LOADED GEAR SURFACES

S. Pakhomova, Ph.D., assistant Professor of Materials Department Bauman Moscow State Technical University, Russia, e-mail: vladisl-2013@yandex.ru

A. Pomelnikova, Ph.D., Professor of Materials Department
Bauman Moscow State Technical University, Russia, e-mail: mgtu2013@yandex.ru

Abstract. The deformation hardening, widely use for the increase of operability of carburized gear wheels. The plastic deformation strengthens the weak sites of the structure and complicates the microplastic deformation development in them. The efficiency of deformation hardening depends on initial structural condition of carburized layer.

Keywords: high-strength steel, carburizing, work hardening, deformation, contact endurance.

Введение. Создание горного оборудования высокой надежности и хороших условий для его безаварийной работы связано с необходимостью создания высокопрочных материалов, идущих на изготовление оборудования. Поэтому одним из путей быстреего повышения эффективности работы оборудования, повышения его надежности является разработка технологии комплексной обработки тяжело нагруженных шестерен из высокопрочных сталей.

Для повышения работоспособности зубчатые колеса из хромоникелевых сталей подвергают комплексному упрочнению, включающему химико-термическую обработку (цементацию) и поверхностное пластическое деформирование (после зубошлифования). Холодная пластическая деформация существенно изменяет строение фаз цементованного слоя, что оказывает определяющее влияние как на характеристики качества поверхностного слоя, так и на важнейшее эксплуатационное свойство зубчатых колес – контактную выносливость.

Цель работы: совершенствование технологии упрочнения высоконагруженных зубчатых колес из цементованных высокопрочных сталей путем поверхностной деформационной обработки, обеспечивающей повышение эксплуатационных свойств.

Материалы и методика исследований. В данной работе исследовали закономерности изменения при дробеструйном наклепе характеристик качества цементованного слоя, тонкой структуры его фаз и их взаимосвязь с контактной выносливостью роликовых образцов из стали 12Х2Н4А с наружным диаметром 30,2 и шириной 18 мм. Образцы проходили типичную для зубчатых колес химико-термическую обработку – цементацию в шахтной печи при $t = 930$ °С на глубину 1,0...1,2 мм, отпуск при $t = 650$ °С 40 мин, закалку в масле от $t = 780$ °С, обработку холодом при $t = -70$ °С, низкий отпуск при $t = 180$ °С 2 ч – и имели твердость поверхности HRC 61...62, в сердцевине HRC 35...39,5.

После шлифования по наружной поверхности (снимали припуск 0,15 мм) роликовые образцы подвергали упрочнению стальной дробью диаметром 0,8...1,0 мм при расходе 9 ± 1 кг/мин и давлении воздуха $0,4 \pm 0,2$ МПа. При этих постоянных параметрах обработки режим упрочнения характеризовали величиной кинетической энергии дроби, приходящейся на единицу обрабатываемой поверхности:

$E = E_{уд} \cdot \tau_{эл}$, где $E_{уд}$ – удельная кинетическая энергия, сообщаемая дробью единице поверхности в единицу времени; $\tau_{эл}$ – время упрочнения элемента цилиндрической поверхности образца, на который дробь падает под эффективными углами $90...45^\circ$. Энергию E изменяли от 20 до 160 кДж/м², $\tau_{эл}$ – от 1 до 8 мин.

Контактную выносливость определяли при испытаниях образцов по схеме качения с проскальзыванием (ГОСТ 25.501), используя двухконтактную роликовую машину Ш17 конструкции ИМАШ им. А.А.Благоднарова. Удельное скольжение образцов (6 %) соответствовало рабочему удельному скольжению зубьев колес в зоне минимальной контактной выносливости. За критерий долговечности стали 12Х2Н4А принимали число циклов до появления на поверхности роликового образца выкрашивания размером не менее ширины рабочей дорожки, равной 8 мм. В качестве смазывающего вещества применяли синтетическое масло дизфирного типа, нагретое до $t = 110 \pm 5$ °С.

На роликовых образцах определяли также распределение микротвердости, тангенциальные остаточные макронапряжения, шероховатость поверхности и структуру поверхностного слоя. Остаточные напряжения оценивали по методу Н. Н. Давиденкова на вырезанных из роликов кольцевых образцах с толщиной стенки 2 мм. Полную величину остаточных напряжений в слое вычисляли как сумму напряжений, измеряемых при разрезке образца по образующей и последовательном удалении слоев при травлении, которое осуществляли на специальной установке с непрерывным измерением деформации с помощью тензометров. Шероховатость поверхности определяли на профилографе-профилометре завода «Калибр». Структуру цементованного слоя образцов стали 12Х2Н4А исследовали методами рентгеноструктурного анализа и дифракционной электронной микроскопии. Ширину интерференционных линий (220) и (211) мартенсита определяли на дифрактометре ДРОН-1 в железном K_α -излучении. Съёмку рентгенограмм проводили на одном и том же участке образца до и после наклепа 5...10 раз и определяли разность $\Delta\beta = \beta_{исх} - \beta_{нак}$, где $\beta_{исх}$ и $\beta_{нак}$ – физическое уширение рентгеновской линии в исходном состоянии и после наклепа соответственно. Электронно-микроскопические исследования тонких фольг

из стали 12Х2Н4А проводили на электронном микроскопе EM6G фирмы AEI при ускоряющем напряжении 100 кВ. Заготовки для фольг изготавливали из вырезанных (на электроимпульсном станке) с поверхности роликовых образцов сегментах высотой около 0,5 мм. С выпуклой стороны заготовку сошлифовывали вручную примерно на 10 мкм, а с плоской – примерно на 410 мкм. Таким образом после электрополирования в хромово-фосфорном электролите получали фольгу, структура которой соответствовала структуре цементованного слоя на расстоянии 50 ± 10 мкм от поверхности.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Поверхностное пластическое деформирование заметно меняет состояние поверхностного слоя образцов стали 12Х2Н4А [1, 2]. Распределение микротвердости по толщине слоя зависит от энергии деформирования (E) и времени обдувки дробью элемента поверхности $\tau_{эл}$ (рис. 1). Степень упрочнения $\delta = (\Delta H / H_{исх} \cdot 100)$ % максимальна при $E \approx 80$ кДж/м² ($\tau_{эл} = 4$ мин). Этот режим обеспечивает также практически предельную толщину упрочненного слоя (около 230 мкм). Режимы с энергией дроби более 80 кДж/м² применять нецелесообразно, так как при этом твердость на поверхности образцов снижается; максимум твердости смещается в подповерхностный слой (см. рис. 1).

Для упрочненных дробью роликовых образцов из стали 12Х2Н4А характерны высокие значения остаточных напряжений сжатия (рис. 2). Максимальные остаточные напряжения и напряжения у поверхности образцов растут с увеличением кинетической энергии дроби, достигая наибольших значений также при $E \approx 80$ кДж/м² ($\tau_{эл} = 4$ мин).

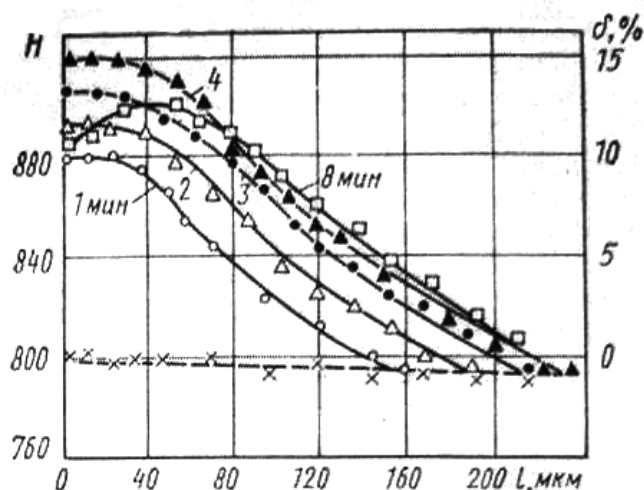


Рис. 1. Распределение микротвердости H по толщине цементованного слоя (l – расстояние от поверхности) стали 12Х2Н4А и степень его упрочнения δ при разном времени обдувки дробью (цифры у кривых).

Штриховая линия – до упрочнения

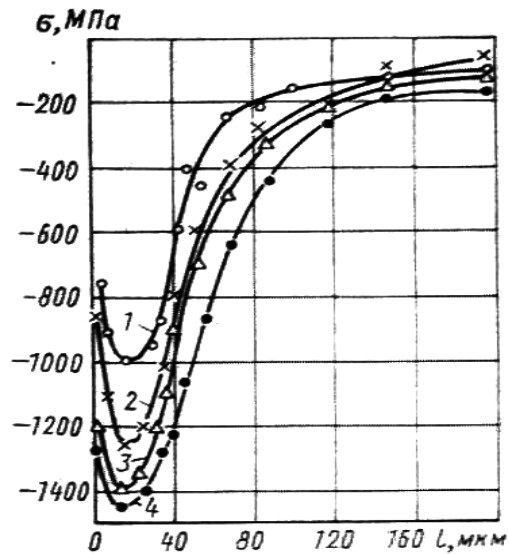


Рис. 2. Эпюры тангенциальных остаточных напряжений σ в образцах стали 12X2H4A. У кривых указано время наклепа элемента поверхности, мин (L – расстояние от поверхности)

Шероховатость поверхности образцов зависит от энергии деформирования (времени наклепа), качества дроби и исходной шероховатости. При низкой походной шероховатости, которую имели роликовые образцы ($Ra = 0,18...0,22$ мкм), и невысокой $E = 20...40$ кДж/м² ($\tau_{эл} = 1...2$ мин) наблюдается ухудшение микрогеометрии поверхности ($Ra = 0,25...0,45$ мкм). При высоких значениях $E \approx 160$ кДж/м² шероховатость поверхности несколько уменьшается ($Ra = 0,23...0,29$ мкм), но не достигает исходного значения.

Наклеп дробью оказывает неоднозначное влияние на контактную выносливость стали 12X2H4A (рис. 3, штрихпунктирная кривая). Повышение ее в 1,5 раза по сравнению с контактной выносливостью в исходном (недеформированном) состоянии наблюдается лишь при упрочнении с $E \approx 40$ кДж/м². Режим обработки с $E \approx 80$ кДж/м², в результате которой достигаются наиболее высокие твердость поверхности и остаточные напряжения сжатия, приводит к снижению долговечности стали 12X2H4A почти в 2 раза. Таким образом, выбор режимов деформирования материала по характеристикам качества поверхности может привести к отрицательному эффекту.

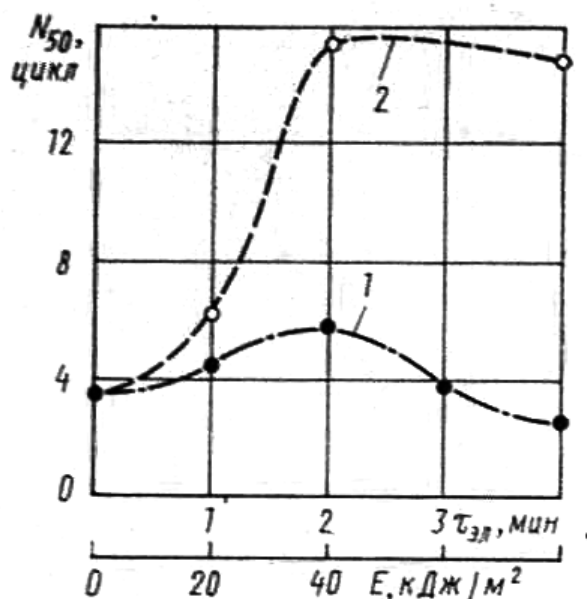


Рис. 3. Контактная выносливость N_{50} стали 12Х2Н4А в зависимости от времени упрочнения $\tau_{эл}$ и кинетической энергии дроби E :

1 – наклеп и естественное старение;

2 – наклеп, виброшлифование и отпуск при $t = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 2 ч

Отсутствие однозначной связи между контактной выносливостью, микротвердостью и остаточными напряжениями сжатия обусловлено существенными изменениями структуры фаз цементованного слоя стали при поверхностном пластическом деформировании. Решающее влияние на эти изменения оказывает взаимодействие в процессе деформации трех фаз – мартенсита отпуска, остаточного аустенита и включений избыточных карбидов [3].

В исходном состоянии мартенсит цементованного слоя стали 12Х2Н4А характеризуется неоднородностью, высокими микроискажениями кристаллической решетки, о чем свидетельствует сильное размытие рентгеновских интерференционных линий (рис. 4).

Остаточный аустенит, количество которого, по данным рентгеноструктурного анализа, составляет в стали 12Х2Н4А до деформационного упрочнения 10...17 %, диспергирован. На темнопольных изображениях он выглядит в виде прослоек различной толщины между кристаллами мартенсита. Из анализа электроннограмм следует, что между остаточным аустенитом и мартенситом существует ориентационное соотношение, близкое к соотношению Курдюмова-Закса, но строго ему не подчиняющееся.

Важная деталь структуры цементованного слоя стали 12Х2Н4А – неоднородно распределенные в мартенситной матрице глобулы избыточных карбидов. Микродифракционный анализ показывает, что они представляют собой карбиды $M_{23}C_6$ с ГЦК-решеткой и параметром $a = 1,062$ нм. По данным микроспектрального энергодисперсионного анализа, такие карбиды, формирующиеся в процессе длительного (5...6 ч) отпуска при $t = 650...680$ °С и не растворяющиеся при нагреве под закалку, содержат в среднем 5...7 % Cr; 0,9...1,6 % Ni; 0,8...1,0 % Mn; 90...92 % Fe.

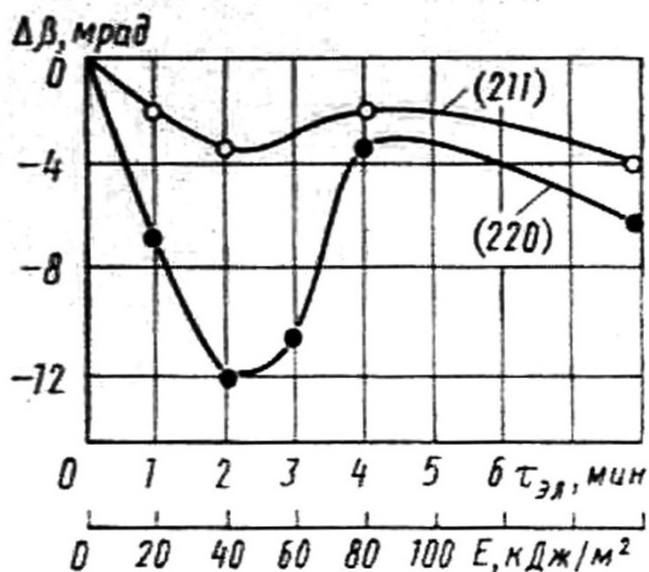


Рис. 4. Изменение физического уширения $\Delta\beta$ интерференционных линий (220) и (211) мартенсита в зависимости от времени упрочнения $\tau_{эл}$ и кинетической энергии дробы E

Результаты анализа размеров карбидных частиц, выполненного на автоматическом анализаторе изображений «Квантимет-720», приведены в таблице 1. В качестве геометрических параметров частиц карбидной фазы приняты их максимальный размер по вертикали (перпендикулярно поверхности образца), а также эквивалентный диаметр, т. е. диаметр круга, площадь которого эквивалентна площади сечения частицы.

В таблице приведено распределение частиц карбидной фазы для зон шириной 20 мкм послойно через каждые 40 мкм по всей толщине заэвтектидной части цементованного слоя. Для каждой зоны распределение карбидных частиц исследовали в размерном диапазоне 0,5...6,5 мкм с разбивкой на 6 классов. Видно, что основная часть карбидов имеет размер около 1...3 мкм.

Наличие достаточно развитой карбидной фазы оказывает неблагоприятное влияние на мартенситную матрицу в процессе ее пластической деформации. «Жесткие» недеформирующиеся включения

карбидов вызывают локализацию в мартенсите микропластической деформации и, как следствие, формирование высоких локальных микронапряжений, приводящих к более раннему зарождению трещин контактной усталости.

Таблица 1 - Морфология карбидной фазы цементованного слоя

Расстояние от поверхности до центра исследуемой зоны, мкм	Объемная доля карбидной фазы, %	Общее число частиц на площади 20×10^3 мкм ²	Число частиц размером, мкм					
			0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5
		
			1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5
10	7,63	345	112	115	82	29	4	3
50	6,33	263	75	88	74	19	7	0
90	3,14	259	174	62	21	9	2	1
130	1,81	348	302	43	2	0	1	0
170	1,07	236	208	26	2	0	0	0
210	1,06	265	239	25	1	0	0	0

Значения локальных напряжений около недеформирующихся включений тем больше, чем выше общий уровень микронапряжений в матрице [1, 2], который зависит, как видно из кривых изменения ширины интерференционных линий мартенсита (см. рис. 4), от режима поверхностного упрочнения. Уменьшение ширины линии при $E \approx 40$ кДж/м² свидетельствует о снижении микроискажений (микронапряжений) кристаллической решетки, что вызвано несколькими причинами. Одна из них – развитие начальных стадий деформационного старения, связанных с переходом атомов углерода в поля напряжений образующихся при деформации дислокаций, чему способствует высокая концентрация углерода в цементованном слое и наличие двойникового мартенсита [2]; другая – релаксация локальных микронапряжений, в том числе и вблизи карбидных включений. Важную роль в этом, по-видимому, играет остаточный аустенит, количество которого при упрочнении с $E \approx 40$ кДж/м² уменьшается более чем в 2 раза.

Повышению контактной выносливости образцов стали 12Х2Н4А способствует деформирование со строго дозированной кинетической энергией дроби, при котором процессы выравнивания микронапряжений и закрепления дислокаций атомами углерода превалируют над процессами увеличения плотности структурных несовершенств и общей напряженности структуры [3, 4]. Однако формирование более стабильной дислокационной структуры происходит при небольшом упрочнении поверхности, поэтому повышение контактной выносливости стали 12Х2Н4А невелико (см. рис. 1 и 3). Наклеп с $E \approx 80$ кДж/м² создает более высокую

степень упрочнения, но вызывает структурные изменения, снижающие локальное сопротивление усталости. При этом режиме упрочнения увеличивается плотность дислокаций в мартенсите и интенсивно развивается деформация матрицы у включений (остаточного аустенита в стали практически нет). Активизируя работу источников дислокаций и блокируя их перемещение, включения карбидов являются местом интенсивного накопления структурных несовершенств, о чем свидетельствует усиление извилистости экситонных контуров мартенситных кристаллов. Следы деформации отчетливо видны и в самих карбидах в виде параллельных линий, свидетельствующих о выходе на их поверхность дислокаций и задержанном сдвиге. При наклепе с $E \approx 80$ кДж/м² отдельные карбиды разрушаются.

Микрообласти мартенсита вблизи карбидов становятся «слабыми звеньями» тонкой структуры стали 12Х2Н4А с пониженным сопротивлением зарождению усталостных трещин.

Важный резерв повышения контактной выносливости стали 12Х2Н4А – применение после наклепа дробью низкотемпературного отпуска (см. рис. 3, кривая 2). Отпуск при $t = 130$ °С 2 ч способствует повышению долговечности стали 12Х2Н4А примерно в 3 раза по сравнению с долговечностью в исходном (после шлифования) состоянии. Его положительное влияние связано с уменьшением локальных микронапряжений вблизи структурных концентраторов напряжений, а также с увеличением степени закрепления дислокаций атомами углерода. Значительное повышение долговечности в результате деформационного старения стали 12Х2Н4А в определенной степени связано с совпадением схем напряженного состояния при наклепе и в зоне контактного нагружения. Блокировка дислокаций протекает более интенсивно в системе плоскостей скольжения, близкой к направлению пластического течения металла при контактном нагружении.

Вместе с тем, закрепление дислокаций усиливает хрупкость цементованного слоя и, как следствие, повышается его чувствительность к качеству поверхности. По этой причине эффективность отпуска максимальна в том случае, если ему предшествует отдельная операция – вбросшлифование (или электрополирование) для уменьшения шероховатости поверхности.

Выводы. 1. Повышение контактной выносливости цементованной стали 12Х2Н4А при наклепе дробью достигается в узком диапазоне режимов упрочнения, когда не возникает локальных повреждений тонкой структуры мартенсита цементованного слоя.

2. Поверхностное пластическое деформирование рекомендуется сочетать с последующим низкотемпературным отпуском, необходимым для релаксации локальных микронапряжений, а также для дополнительного упрочнения мартенсита за счет его деформационного старения. В результате такого комбинированного упрочнения контактная выносливость стали 12Х2Н4А повышается в 3 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка поверхностным пластическим деформированием: Справочник. – М.: Машиностроение, 2002. 300 с.
2. Панин В. Е., Панин А. В. Фундаментальная роль наномасштабного структурного уровня пластической деформации твердых тел // Металловедение и термическая обработка металлов. - 2006. - № 12. - С. 5-10.
3. Материаловедение: Учебное пособие для ВУЗов / Л.В.Тарасенко, С.А. Пахомова, М.В. Унчикова. - М.: Изд-во ИНФРА-М, 2012. - 475 с.
4. Пахомова С.А., Рыжов Н.М. Совершенствование технологии поверхностного упрочнения шестерен из высокопрочной стали // Тяжелое машиностроение. - 2009. - № 10. - С. 35-38.

УДК 621.753

ГРАФИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПОСАДКИ С НАТЯГОМ

С.Т. Пацера, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии горного машиностроения

Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», г. Днепропетровск, Украина, e-mail: witiw@rambler.ru

И.В. Вернер, заведующий лабораторией информационных технологий проектирования, кафедра основ проектирования механизмов и машин

Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», г. Днепропетровск, Украина, e-mail: Ziborov@nmu.org.ua

В.А. Дужак, студент группы ИМмм-10-1

Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», г. Днепропетровск, Украина, e-mail: girl_mechanic@mail.ru

Аннотация. В работе предложена графическая интерпретация функционирования посадки с натягом на основе введения понятия «качество посадки» в обобщенном виде. Показана принципиальная возможность определения оптимального допуска посадки.

Ключевые слова: посадка с натягом, допуск посадки, критерий качества посадки.