

## СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-752-764

### POPPERATIONAL CHANGE OF SURFACE LAYER QUALITY OF STEEL PARTS AFTER DIFFERENT MECHANICAL PROCESSING METHODS

**A. M. Gafarov, Ch. M. Aliyev, A. M. Guliyev**

Azerbaijan State Marine Academy, Baku, Azerbaijan Republic

*The article is devoted to the actual problem for the machine building: the development of new improvements to existing technological methods of processing, which significantly increases the wear resistance of surfaces of precision parts of machines and equipment. Information on the quality of surfaces precision parts is not always distinguished by the originality of technological solutions in the available technical literature. We mainly consider the technological capabilities of individual traditional finishing methods, which are not always provided the required wear-resistance characteristics of the machine parts and equipment surface layers. The purpose of the study is to improve the precision parts surfaces quality of machines and equipment by creating new and improving existing methods of processing and determining technological capabilities, the processes examined, taking into account the rational combination of successive operations. The rotational boring process has been improved to solve this problem. Original methods of machining have been developed, such as grinding with vibration damping, rotational honing, dosed lapping, elastic rolling, etc.*

*The recommended technological processing methods of machines high-precision parts are progressive, both in the accuracy and quality ensuring of the surface and productivity. Rotational boring was carried out with the use of a special rotary boring head on the mod.1K62 machine. When grinding with vibro-damping is used mod.3B227 machine equipped with a special vibro-grinding head. Rotational honing is performed on the mod.3M82S machine, on which the rotary honing head is mounted, the dosed lapping is performed on the mod.2H135 and 1K62 machines equipped with special lapping heads, the elastic rolling is performed on the mod.1A730 machines, using a special designed elastic rolling head. As the processed material, Steels of grade 38XM10A, 30X13, 40X and 45 are used.*

*Rational parameters of the examined technological operations are determined, based on the results of experimental studies, ensuring optimal parameters for the surface quality of parts. The values of the operational change in the surface quality indices (roughness, residual stress, micro hardness) are determined with the selected combination of recommended technological operations. The developed and improved methods have been successfully used in processing high-precision parts of machines in laboratory conditions and are recommended for introduction into production.*

*Keywords: technological processes, detail, roughness, residual stress, micro hardness, surface layer, operational change, wear, reliability, machinery, equipment.*

**For citation:**

Gafarov, Aydin M., Chingiz M. Aliyev, and Alimardan M. Guliyev. "Popperational change of surface layer quality of steel parts after different mechanical processing methods." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.4 (2017): 752–764. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-752-764.

**УДК.621-192; 621.81-192**

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПООПЕРАЦИОННОГО ИЗМЕНЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ СУДОВЫХ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ, ОБРАБОТАННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ

**А. М. Гафаров, Ч. М. Алиев, А. М. Кулиев**

Азербайджанская Государственная Морская Академия,  
Баку, Азербайджанская Республика

Статья посвящена актуальной для машиностроения задаче: разработке новых и усовершенствованию существующих технологических способов обработки, существенно повышающих точность и качество поверхности, а также износостойкость поверхностных слоев высокоточных деталей машин и оборудования. Имеющаяся в технической литературе информация о качестве поверхностей высокоточных деталей не всегда отличается комплексностью выявления основных показателей качества поверхностей и оригинальностью технологических решений. В основном рассматриваются технологические возможности отдельных традиционных методов финишной обработки по отдельным параметрам качества поверхности, которые не позволяют однозначно ответить на вопросы, связанные с влиянием этих показателей на износостойкостные характеристики поверхностных слоев деталей машин и оборудования. Для решения указанной проблемы усовершенствован процесс ротационного растачивания. Разработаны оригинальные способы механической обработки, такие как шлифование с виброгашением, ротационное хонингование, притирка с дозированным съемом материала, раскатывание с регулированием деформирующих усилий.

Рекомендуемые технологические способы обработки высокоточных деталей машин являются прогрессивными как по обеспечению требуемой точности, качества поверхности, износостойкости, так и по производительности. Ротационное растачивание осуществлялось на станке мод. 1К62 с применением специальной ротационной расточной головки. При шлифовании с виброгашением использовался внутришлифовальный станок мод. 3Б227, оснащенный специальной виброшлифовальной головкой. Ротационное хонингование производилось на станке мод. 3М82С с установленной ротационной хонинговальной головкой. Притирка с дозированным съемом материала выполнялась на станках мод. 2Н135 и 1К62, оснащенных специальными притирочными головками. Раскатывание с регулированием деформирующих усилий производилось на станке мод. 1А730 с применением эластичной раскатной головки специальной конструкции. В качестве обрабатываемого материала использовались стали марки 38ХМЮА, 30Х13, 40Х и 45.

По результатам экспериментальных исследований определены рациональные параметры рассмотренных технологических операций, обеспечивающие оптимальные показатели качества поверхностей деталей. Установлены величины пооперационного изменения показателей качества поверхности, таких как шероховатость, остаточное напряжение, микротвердость при выбранном сочетании рекомендуемых технологических операций. Разработанные и усовершенствованные методы успешно использованы при обработке высокоточных деталей машин в лабораторных условиях и рекомендованы для внедрения в производство.

**Ключевые слова:** технологический процесс, деталь, шероховатость, остаточное напряжение, микротвердость, поверхность, слой, пооперационное изменение, износ, надежность, машина, оборудование.

**Для цитирования:**

Гафаров А. М. Исследование пооперационного изменения качества поверхностного слоя высокоточных деталей судовых машин и механизмов, обработанных различными методами / А. М. Гафаров, Ч. М. Алиев, А. М. Кулиев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 752–764. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-752-764.

**Введение**

Результаты многочисленных исследований показывают, что разрушение поверхностей деталей машин и оборудования в основном связаны с воздействием на них различных механических и физико-химических процессов. Потеря работоспособности отдельных деталей может проявляться в виде трещинообразования, усталости, коррозии, кавитации, эрозии, адсорбции, пластической деформации, износа, а также факторов смешанного характера [1], [2]. В зависимости от места протекания процессы бывают объемными, поверхностными, протекающими в подвижных и неподвижных соединениях деталей [1], [3]. Наиболее распространенными факторами, оказывающими существенное влияние на долговечность деталей машин и механизмов, являются качественные показатели поверхностного слоя, технологические методы обработки, режимы резания, материалы деталей и т. д. Результаты проведенных исследований [1] показывают, что на износостойкость деталей машин положительное влияние оказывают оптимальные величины шероховатости поверхности  $R_a$ , сжимающие остаточные напряжения  $\sigma$ , повышенная величина и глубина распространения микротвердости  $H$  поверхностного слоя.

Многие процессы разрушения и старения определяются состоянием и свойствами поверхностных слоев материалов, поэтому обеспечение объемной прочности не всегда гарантирует надежность элементов в целом. Так как физические механизмы процессов и явлений при поверхностном разрушении коренным образом отличаются от объемных механизмов, то обычно наибольшую трудность представляет выбор материалов и обеспечение поверхностной прочности элементов с учетом конструктивных, технологических и эксплуатационных требований [1], [4].

Одной из часто встречающихся причин отказов машин и механизмов является износ поверхностей их ответственных деталей и нарушение условий трения. При конструировании узлов трения необходимо выбирать такой вид трения, формы и размеры трущихся поверхностей деталей, чтобы обеспечить в заданном диапазоне скоростей и нагрузок высокую износостойкость при отсутствии повреждаемости рабочих поверхностей. Эти задачи решаются рациональным сочетанием материалов деталей узлов трения с конструктивными и технологическими мероприятиями, направленными на устранение основных причин, вызывающих конкретный вид повреждаемости [5], [6]. Трущиеся поверхности деталей машин в основном формируются под воздействием тех или иных методов механической обработки. При выборе методов механической обработки деталей следует учитывать следующие основные условия [6]:

- наследственные характеристики механической обработки, которые предшествуют операциям финишной обработки, по возможности не должны влиять на интенсивность будущего эксплуатационного износа;

- операции механической обработки, предшествующие финишным, должны отвечать требованиям, главным образом, по точности и форме детали;

- финишные операции обработки должны формировать поверхности по свойствам (шероховатость поверхности, остаточное напряжение, микротвердость поверхностного слоя), наиболее близким к свойствам, которые устанавливаются на трущихся поверхностях после эксплуатационной приработки, чем обеспечивается минимальный износ в процессе приработки. (Такой износ поверхностей деталей характерен для установившегося процесса);

- при выборе финишных методов обработки следует учитывать технологические возможности применяемых операций и режимы воздействия инструмента на обрабатываемую поверхность.

Из-за многообразия используемых сталей и качественных показателей поверхностных слоев трущихся деталей, а также разных условий изнашивания и приработки деталей машин и механизмов нецелесообразно устанавливать для каждой трущейся пары конкретные качественные показатели поверхностных слоев после приработки. Рациональнее устанавливать взаимосвязи изменения этих показателей в широком диапазоне с режимами и условиями выполнения разных видов финишной обработки. Основным качественным показателем поверхностного слоя деталей машин является шероховатость поверхности  $R_a$ . Оптимальными значениями шероховатости поверхности, обеспечивающими минимальный износ трущихся пар, является значение той шероховатости, которое устанавливается в процессе реальной эксплуатации кинематических пар после периода приработки, т. е. в период установившегося износа. Другие показатели качества поверхности (остаточное напряжение и микротвердость поверхностного слоя) должны быть не ниже тех значений, которые формируются в процессе установившегося износа деталей.

На основании изложенного можно предположить, что если удастся получить после механической обработки шероховатость поверхности и другие показатели качества поверхностного слоя равными или превышающими эксплуатационные показатели, а глубина распространения исходных показателей будет близка или превышать величину допустимого износа, то будет решена задача существенного уменьшения износа деталей машин и механизмов.

Анализируя причины выхода из строя типовых деталей машин и механизмов, можно прийти к выводу о том, что эти детали необходимо выделить в отдельные группы и разработать для них типовые или унифицированные технологические планы с нормированными режимами резания и другими условиями обработки. Однако разработка таких унифицированных типовых планов

затруднена выходом из строя деталей машин и механизмов по различным причинам и недостаточной информацией о возможностях различных технологических операций.

Для обеспечения минимальных простоев машин и оборудования, связанных с их ремонтом из-за поломок или износа деталей, необходимо решать проблему увеличения межремонтного периода эксплуатации. Это особенно касается машин и механизмов, эксплуатируемых в чрезвычайных ситуациях и экстремальных условиях, например: пожарное оборудование, различные насосы, специальные гидравлические и пневматические устройства и инструменты и т. д., нефтяное оборудование (электроцентробежные, штанговое скважинные, гидропоршневые, стройные, электровинтовые насосы, вертлюги, газолифтные и др. оборудование), судовые машины и механизмы (брашпили, дизельные двигатели, компрессоры, насосы различных назначений и т. д.).

Для снижения интенсивности поломок и других видов разрушений необходима рационализация технологии механической обработки, существенно повышающая износостойкость и усталостную прочность тех деталей, которые в основном определяют длительность периода непрерывной работы машин и оборудований. К таким деталям относятся цилиндры, плунжеры и втулки насосов, подшипники скольжения грузового вала и турочки брашпиля, цилиндры двигателей внутреннего сгорания, цилиндры, кольца, гильзы различных типов компрессоров и многочисленные высокоточные детали машин и оборудования, отличающиеся нежесткостью, тонкостенностью, чувствительностью к различным технологическим неполадкам, высокими требованиями к показателям по точности и качеству поверхности, труднообрабатываемостью материала, из которого они изготовлены. При проведении экспериментов были использованы высокоточные унифицированные образцы, точность которых находилась в пределах 6- – 8-го квалитетов, в основном близкие по своим геометрическим и качественным показателям к указанным деталям.

Несмотря на многочисленные исследования качества поверхностей деталей машин, имеется мало работ, посвященных комплексному анализу технологических возможностей отдельных финишных методов обработки по этим показателям. Комплексные исследования по рекомендуемым методам фактически отсутствуют, некоторые исключения составляют исследования по ротационному точению. Имеющаяся в технической литературе информация о качестве поверхностей деталей показывает технологические возможности отдельных традиционных методов финишной обработки, не отличается оригинальностью технологических решений и не отражает особенности обработки высокоточных нежестких тонкостенных цилиндрических деталей. Комплексный анализ причин износа высокоточных деталей машин и оборудования показывает, что в кинематической паре «втулка – вал» наибольшему износу подвержены отверстия деталей типа втулок. В среднем износ втулок в 1,9 – 2,1 раза превышает износ валов, что свидетельствует о необходимости первым делом совершенствовать технологические способы повышения износостойкости отверстий. Поэтому разработка новых и усовершенствование существующих способов механической обработки, улучшающих точностные, качественные и износостойкостные характеристики поверхностных слоев высокоточных деталей машин является актуальной задачей машиностроения.

Целью исследования является повышение износостойкости и сопротивления другим видам разрушения высокоточных деталей машин и оборудования путем создания новых и усовершенствования существующих способов обработки и определения технологических возможностей рассмотренных процессов в отношении обеспечения требуемых качественных показателей поверхностного слоя, таких как шероховатость поверхности, остаточное напряжение и микротвердость поверхностного слоя с учетом рационального сочетания последовательно выполняемых операций. Для решения указанной проблемы разработаны оригинальные способы механической обработки, такие как шлифование с виброгашением, ротационное хонингование, притирка с дозированным съемом материала, раскатывание с регулированием деформирующих усилий; усовершенствован процесс ротационного растачивания. Впервые установлена взаимосвязь технологических параметров указанных процессов с комплексом показателей качества поверхности, таких как шероховатость, остаточное напряжение и микротвердость.



### **Методика проведения экспериментов, применяемое оборудование и оснастка, измерительные приборы и инструменты**

Ротационное растачивание осуществлялось на станке мод. 1К62 с применением специальной ротационной расточной головки. При шлифовании с виброгашением использовался внутришлифовальный станок мод. 3Б227, оснащённый специальной виброшлифовальной головкой. Ротационное хонингование производилось на станке мод. 3М82С, на котором установлена специальная конструкция ротационной головки. Притирка с дозированным съёмом материала поверхностного слоя выполнялась на станках мод. 2Н135 и 1К62, оснащённых специальными самоустанавливающимися приспособлениями для крепления деталей и специальными притирочными головками. Раскатывание с регулированием деформирующих усилий деталей производилось на станке мод. 1А730 с применением специальной конструкции эластичной раскатной головки. В качестве обрабатываемого материала использовались стали марок 38ХМЮА, 30Х13, 40Х и 45.

Эксперименты проводились на унифицированных образцах, по своим точностным и качественным показателям близких к высокоточным деталям указанного оборудования, изготовленных из перечисленных материалов, со следующими размерами: диаметр наружной поверхности 55 мм, диаметр внутренней поверхности 45 мм, длина  $l = 300$  мм. Точность обработанных поверхностей деталей находилась в пределах 6- – 8-го квалитетов. Для установления связи между точностными и качественными показателями обработанных поверхностей деталей контрольные измерения образцов проводились микрометром, индикаторным нутромером, а также рычажно-оптическими приборами. Точность измерения, в зависимости от применяемого мерительного средства и обрабатываемой поверхности, составляла от 0,01 до 0,001 мм. Шероховатость обработанной поверхности измерялась с помощью профилометра — профилографа мод. 201, с записью профилограмм обработанной поверхности согласно методике, изложенной в работе [7]. При определении остаточных напряжений на втулках применяли способ акад. Н. Н. Давиденкова, поскольку образцы могут рассматриваться как тонкостенные трубы. При проведении экспериментов определялись тангенциальные остаточные напряжения. В зависимости от знака остаточных напряжений ширина разреза вырезанного кольца по образующей увеличивается или уменьшается [7], [8]. При исследовании микротвердостей поверхностных слоев использован метод «косого среза» под углом, равным  $1,5^\circ$ .

### **Выбор рациональных параметров технологических операций**

Технологические процессы при выполнении экспериментальных исследований являются прогрессивными как по обеспечению точности и качества поверхности, так и по производительности [6], [9]. Рациональными параметрами рассмотренных технологических операций по обеспечению оптимальных показателей качеств поверхности являются:

- а) для ротационного растачивания:
  - глубина резания 0,3 – 1,5 мм;
  - подача 0,4 – 0,6 мм/об;
  - скорость резания 2,0 – 2,4 м/с;
  - передний угол заточки 30 – 35°;
  - задний угол заточки 26 – 28°;
  - угол установки резца в вертикальной плоскости 28°;
  - угол установки резца в горизонтальной плоскости 36°;
  - ширина упрочняющей фаски до 0,1 мм;
  - материал режущей чашки Т15К6, Т5К10, Т14К8;
- б) для шлифования с виброгашением:
  - скорость вращения детали 1,5 – 1,8 м/с;
  - скорость вращения шлифовального круга 40 – 50 м/с;
  - продольная подача 15 – 25 мм/об;
  - зернистость шлифовального круга 25 – 40 мкм;

в) для ротационного хонингования:

- окружная скорость ротационной хонинговальной головки 0,75 – 1,0 м/с;
- скорость возвратно-поступательного движения 0,15 – 0,2 м/с;
- окружная скорость ротационного ролика 1,8 – 2,5 м/с;
- величина давления ротационного ролика на обрабатываемую поверхность 60 – 80 МПа;

г) для притирки с дозированным съемом материала поверхностного слоя:

- скорость вращательного движения 0,11 – 0,15 м/с;
- скорость возвратно-поступательного движения 0,02 – 0,03 м/с;
- величина удельного давления 150 – 180 кПа;
- зернистость притирочных паст 10 – 20 мкм (для тонких доводочных работ 3 – 5 мкм);

д) для эластичного раскатывания:

- контактное давление 1500 – 1800 Н;
- подача 0,2 – 0,4 мм/об;
- скорость обработки 2,2 – 2,8 м/с;
- диаметр раскатного шарика  $d = 3 - 6$  мм;
- количество рабочих ходов раскатной головки 2 – 3 раза.

Формирование качественных показателей поверхностного слоя деталей после обработки исследованными методами механической обработки

Пооперационное изменение параметров точности и качества поверхности является определяющим фактором при выборе вида и количества технологических операций, что непосредственно влияет на трудоемкость изготовления деталей. Требуемые точность и качество поверхности могут быть достигнуты двумя-тремя или многочисленными технологическими операциями, что приводит к снижению эффективности производства. Поэтому используя параметры пооперационного изменения точности и качества обработанных поверхностей, можно определить оптимальное количество и сочетание технологических операций изготовления высокоточных деталей машин и оборудования.

Как известно, параметры качества поверхности деталей являются случайными величинами и могут быть охарактеризованы с помощью законов теории вероятности. Согласно [5], [6] и [10], для характеристики случайной величины иногда удобно пользоваться не функциями распределения, а количественными показателями, содержащими достаточную информацию о ее распределении. Учитывая, что основными характеристиками случайной величины являются математическое ожидание, дисперсия, моменты, мода, медиана, коэффициент вариации, которые определяют точность и достоверность полученных данных, рассмотрим также их отличительные особенности. Например, математическое ожидание для различных случаев имеет разную интерпретацию [5]:

– для дискретных случайных величин (при измерении шероховатости поверхности на разной базовой длине)

$$M_x = x_{cp} = \sum_i x_i P(x_i); \quad (1)$$

– для непрерывных случайных величин (при измерении остаточных напряжений поверхностного слоя по методу акад. Н. Н. Давиденкова)

$$M_x = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x) dx = \int_{-\infty}^{+\infty} xdF(x); \quad (2)$$

– для неотрицательных непрерывных случайных величин (при измерении микротвердости поверхности методом «косого среза»):

$$M_x = \int_0^{\infty} [1 - F(x)] dx = \int_0^{\infty} P(x) dx. \quad (3)$$

Следует помнить, что математическое ожидание является также начальным моментом первого порядка распределения  $F(x)$

$$M_n(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} x^n dF(x). \quad (4)$$

Учитывая, что дисперсия характеризует разброс случайной величины и является центральным моментом второго порядка распределения  $F(x)$ , ее можно рассмотреть как математическое ожидание:

$$D(x) = M[x - M(x)]^2 = M(x^2) - M^2(x). \quad (5)$$

Для непрерывной случайной величины формула (5) имеет вид:

$$D(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} [x - M(x)]^2 dF(x). \quad (6)$$

Другие характеристики случайной величины определяются согласно методике, изложенной в работе [5].

Основной задачей экспериментальных исследований является определение технологических возможностей разработанных технологических методов обработки по обеспечению качественных показателей поверхностного слоя деталей и их пооперационное изменение. В результате проведенных работ определены величина шероховатости поверхности  $R_a$ , остаточное напряжение  $\sigma$  и микротвердость поверхностного слоя  $H$  на операциях ротационного точения, шлифования с виброгашением, ротационного хонингования, притирки с дозированным съемом материала поверхностного слоя и раскатывания с регулированием деформирующих усилий. На рис. 1 приведен график пооперационного изменения шероховатости  $R_a$  поверхности при различных методах механической обработки.

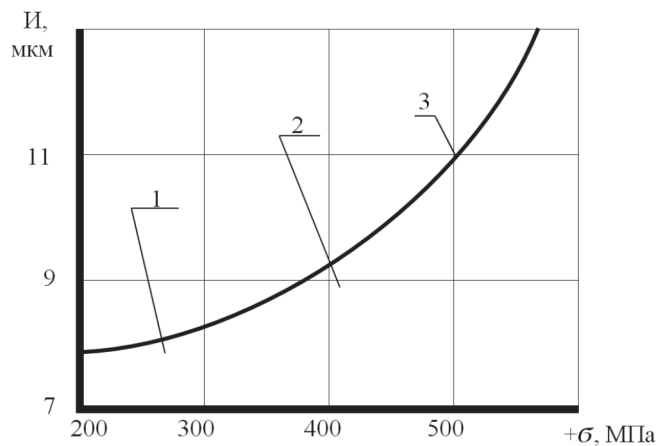


Рис. 1. Зависимость износа деталей  $I$  от остаточных напряжений поверхностного слоя  $\sigma$  (поверхность обработана ротационным резанием):  
1 — сталь 30X13; 2 — сталь 40X; 3 — сталь 45

Одним из прогрессивных технологических процессов механической обработки высокоточных деталей машин и механизмов является ротационное резание. Для осуществления вращательного движения режущей части ротационного инструмента известны два вида ротационного резания: с принудительным вращением от специального привода и самовращением в результате взаимодействия с обрабатываемым материалом. В зависимости от ориентации режущей чашки также имеются две схемы: прямая и обратная. При первой схеме торец чашки выполняет функцию передней поверхности, при второй — задней. Если режущая чашка наклонена в направлении вектора подачи инструмента относительно обрабатываемой поверхности, имеет место прямая схема резания. Противоположное направление соответствует обратной схеме [6]. Обычно для обработки

труднообрабатываемых материалов рекомендуется обратная схема резания. Рациональной областью применения прямой схемы является чистовая обработка. Анализ проведенных исследований показывает, что ротационным инструментом можно обеспечить шероховатость обработанной поверхности в пределах  $R_a = 0,8 - 1,0$  мкм.

Преимуществом ротационного резания является то, что оно может быть использовано как в качестве предварительного, так и окончательного метода обработки, одновременно обеспечивая высокую производительность процесса и большую стойкость режущего инструмента. Однако при изготовлении высокоточных деталей ротационное резание может быть использовано как получистовой метод обработки до процесса шлифования [7].

Процесс шлифования с виброгашением является новым технологическим процессом механической обработки. В зависимости от требований к точности и качеству обрабатываемой поверхности он может быть использован в качестве финишной обработки, а по необходимости также как предварительный процесс под хонингованием. Шероховатость поверхности после шлифования с виброгашением находится в пределах  $R_a = 0,3 - 0,8$  мкм. Из-за снижения вибрации технологической системы при шлифовании с виброгашением качественные показатели поверхностного слоя существенно улучшаются, что приводит к благоприятным эксплуатационным характеристикам контактных поверхностей деталей.

При ротационном хонинговании режущие бочкообразные ролики устанавливаются под углом к оси хонинговальной головки и при обработке деталей имеют возможность вращения вокруг своих осей [6]. Для ротационного хонингования характерна прерывистость следов на обрабатываемой поверхности, что является результатом постоянного обновления режущих частей бочкообразных алмазных роликов. При этом прерывистость резания единичных зерен сопровождается процессом стабильного стружкообразования. Постоянное обновление режущей части алмазных роликов ротационной хонинговальной головки позволяет во время холостого пробега промывать рабочие участки инструмента смазывающей охлаждающей жидкостью и охлаждать их. При ротационном хонинговании не происходит налипания металла на контактную часть поверхности роликов. Процесс обработки осуществляется под воздействием новых обновленных участков алмазных роликов, что существенно повышает качественные показатели поверхностного слоя деталей (рис. 2).

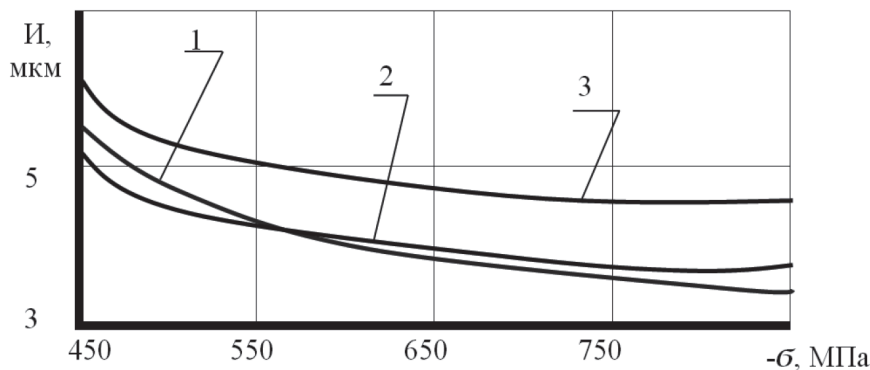


Рис. 2. Зависимость износа деталей  $I$  от остаточных напряжений поверхностного слоя  $\sigma$  (поверхность обработана алмазным выглаживанием):  
 1 — сталь 30X13; 2 — сталь 40X; 3 — сталь 45

Шероховатость обработанной поверхности при ротационном хонинговании изменяется в пределах  $R_a = 0,15 - 0,45$  мкм. Ротационное хонингование может быть использовано как в качестве чистовой, так и окончательной операции, а также в качестве предварительной тонкой притирочно-доводочной операции.

Притирка с точки зрения формирования поверхностного слоя является сложным технологическим процессом и зависит от приложенной нагрузки, от направления движения зерен при-



тирочных паст, от скорости перемещение зерен, исходной шероховатости и др. Использование мелкозернистых паст в процессе притирки, наряду с уменьшением шероховатости обработанной поверхности, снижает также и производительность обработки. Микрорезание переходит к полированию. В связи с этим следует разработать такие методы обработки притиркой, которые позволяют обеспечить, наряду с требуемой шероховатостью поверхности, и высокую производительность. Одним из таких методов является притирка с дозированным съемом материала поверхностного слоя. Этот метод позволяет при помощи специального устройства регулировать разжим притира по мере съема материала поверхностного слоя, заполнять поверхность притира и зону обработки пастой необходимой толщины и, по мере износа притира, освобождать отработанную пасту из зоны резания и добавлять дополнительную порцию пасты. Следует учитывать, что изменение размеров абразивных частиц в составе притирочных паст существенно изменяет характер процесса микрорезания и химического воздействия на обрабатываемую поверхность. Шероховатость обработанной поверхности при дозированной притирке может быть изменена в широких пределах регулированием основных параметров технологического процесса. Шероховатость притиренных поверхностей при оптимальных параметрах режимов обработки находится в пределах  $R_a = 0,05 - 0,15$  мкм.

Притирка с дозированным съемом материала поверхностного слоя является финишным методом обработки, однако при необходимости может быть использована как предварительная операция под раскатывание с регулированием деформирующих усилий высокоточных деталей.

Шероховатость поверхности при раскатывании с регулированием деформирующих усилий формируется под воздействием упругого-пластического деформирования тонкого поверхностного слоя. При раскатывании с регулированием деформирующих усилий для уменьшения вредного влияния повышенных сил обработки на точностные параметры поверхностей нежестких тонкостенных деталей в конструкции раскатной головки предусмотрено специальное устройство для регулирования деформирующих сил [9]. Использование ротационного растачивания перед шлифованием с виброгашением, шлифования с виброгашением перед ротационным хонингованием, ротационного хонингования перед притиркой с дозированным съемом материала поверхностного слоя, притирки с дозированным съемом материала поверхностного слоя перед раскатыванием с регулированием деформирующих усилий позволяет уменьшать шероховатость обработанной поверхности в пять-шесть раз. Однако следует отметить, что совместное применение процессов ротационного хонингования с притиркой с дозированным съемом материала поверхностного слоя, притирки с дозированным съемом материала поверхностного слоя с раскатыванием или ротационного хонингования с раскатыванием с регулированием деформирующих усилий неэффективно, и такие схемы обработки могут быть использованы в случае крайней необходимости. Результаты экспериментов показывают, что при рациональных величинах сил раскатывания фактически на первой стадии обработки происходит полная деформация неровностей, формирующихся в течение предыдущих операций. Дальнейшее увеличение сил раскатывания приводит к пластическим искажениям поверхностного слоя, которые ухудшают не только показатели шероховатости, но и физико-механические характеристики поверхностей деталей. Шероховатость поверхности, обработанной раскатыванием с регулированием деформирующих усилий, находится в пределах  $R_a = 0,05 - 0,1$  мкм.

Одним из основных показателей, характеризующих качественные показатели поверхностей деталей, является микротвердость  $H$  поверхностного слоя. На рис. 3 показаны графики пооперационного изменения микротвердости поверхностного слоя при ротационном растачивании, шлифования с виброгашением, ротационном хонинговании, притирке с дозированным съемом материала поверхностного слоя и раскатывании с регулированием деформирующих усилий. Наибольшей микротвердостью  $H$  характеризуются поверхности, обработанные раскатыванием с регулированием деформирующих усилий, наименьшей — шлифованием с виброгашением. Микротвердость поверхностей, обработанных указанными методами, в зависимости от обрабатываемых материалов изменяется в пределах 4700 – 9500 МПа.

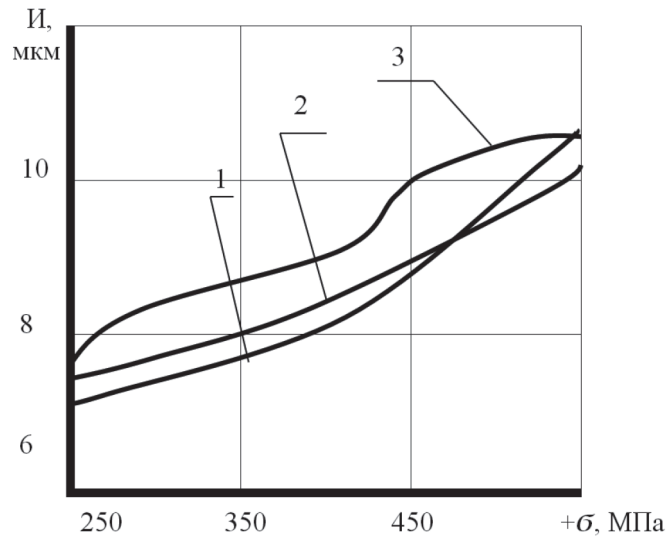


Рис. 3. Зависимость износа деталей  $I$  от остаточных напряжений поверхностного слоя  $\sigma$  (поверхность обработана шлифованием):  
 1 — сталь 30X13; 2 — сталь 40X; 3 — сталь 45

Формирование микротвердости  $H$  поверхностного слоя происходит под действием многочисленных факторов и основывается на комплексном воздействии конструктивных, технологических и режимных параметров. Фактически единственным способом, позволяющим регулировать качество поверхностного слоя деталей машин, являются технологические методы [6], [11].

Результаты проведенных работ показывают, что обеспечение поверхностей с заданной микротвердостью существенно уменьшает смятия и стирания поверхностей, снижает уровень пластической деформации контактных участков, ограничивает взаимное внедрение деформированных слоев поверхностей деталей. Характер пооперационного изменения остаточных напряжений  $\sigma$  поверхностного слоя при рассмотренных технологических операциях показан на рис. 4.

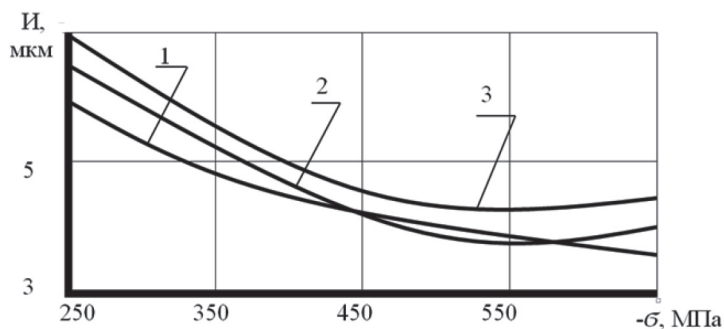


Рис. 4. Зависимость износа деталей  $I$  от остаточных напряжений поверхностного слоя  $\sigma$  (поверхность обработана хонингованием):  
 1 — сталь 30X13; 2 — сталь 40X; 3 — сталь 45

По результатам экспериментальных исследований установлено, что для ротационного растачивания и шлифования с виброгашением характерны растягивающие для ротационного хонингования притирки с дозированным съемом материала поверхностного слоя и раскатывания с регулированием деформирующих усилий, сжимающие остаточные напряжения. Формирование на поверхностных слоях деталей растягивающих остаточных напряжений после ротационного растачивания и шлифования с виброгашением связаны с высокими температурами, возникающими в зоне резания в процессе обработки (600 – 650 °С — при ротационном растачивании;

800 – 850 °С — при шлифовании с виброгашением). При ротационном хонинговании и притирке с дозированным съемом материала поверхностного слоя образования на поверхностях деталей, снимающих остаточные напряжения, являются результатом облегчения условий пластической деформации поверхностного слоя по сравнению с предыдущими методами механической обработки. Ротационное хонингование и притирку с дозированным съемом материала поверхностного слоя можно отнести к так называемым «холодным» видам механической обработки (температура в зоне обработки в зависимости от условий обработки изменяется в пределах 120 – 250 °С) — рис. 5.

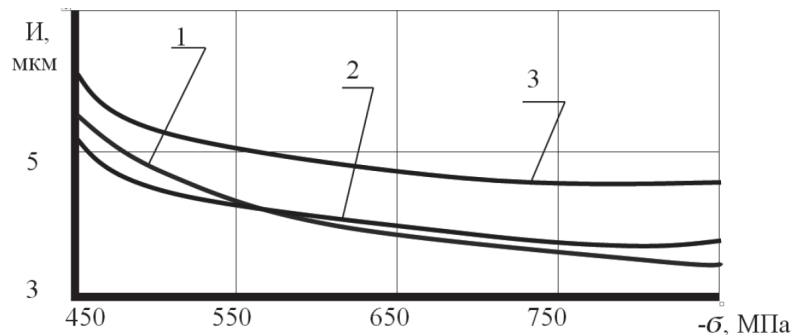


Рис. 5. Зависимость износа деталей  $I$  от остаточных напряжений поверхностного слоя  $\sigma$  (поверхность обработана притиркой):  
1 — сталь 30X13; 2 — сталь 40X; 3 — сталь 45

Эффективность раскатывания с регулированием деформирующих усилий определяется в зависимости от режимов обработки, состояния и свойств обрабатываемых материалов, от геометрических параметров деформирующих элементов раскатной головки и т. д. При раскатывании с регулированием деформирующих усилий, из-за возможности регулирования давления, на поверхности происходит поэтапное сглаживание сначала наиболее острых выступов, а потом нижележащих неровностей. В процессе раскатывания с регулированием деформирующих усилий растянутые поверхности, формирующиеся предыдущими операциями со снятием стружки, вместе с припусками, предусмотренными для раскатывания, сжимаются, иногда дополнительно деформируются и создают на поверхностном слое деталей сжимающие остаточные напряжения.

### Выводы и основные результаты

Разработаны новые прогрессивные методы механической обработки, установлены их технологические возможности, определен характер изменения качественных показателей поверхностей деталей при их применении. Решение перечисленных задач направлено на существенное повышение эффективности машиностроительного производства. Подтверждены возможности применения процессов ротационного растачивания, шлифования с виброгашением, ротационного хонингования, притирки с дозированным съемом материала поверхностного слоя и раскатывания с регулированием деформирующих усилий при обработке высокоточных нежестких тонкостенных деталей. Определен комплекс технологических условий, обеспечивающих требуемые качества обработанных поверхностей деталей. При рекомендуемой последовательности выполняемых операций величина шероховатости поверхности изменяется в пределах 1,0 – 0,005 мкм, остаточное напряжение  $\sigma$  — от +600 МПа до –920 МПа, микротвердость поверхностного слоя  $H$  в пределах 5200 – 10500 МПа. При операциях ротационного точения и шлифования на поверхностном слое формируются, главным образом, растягивающие остаточные напряжения, на операциях ротационного хонингования, притирки с дозированным съемом материала поверхностного слоя и раскатывания с регулированием деформирующих усилий — сжимающие остаточные напряжения.

В результате проведенных исследований усовершенствован процесс ротационного растачивания, разработаны новые методы обработки, такие как шлифование с виброгашением, ротационное хонингование, притирка с дозированным съемом материала поверхностного слоя и раскатывание с регулированием деформирующих усилий, которые обеспечивают требуемую точность обработки в пределах 6 – 8-го квалитетов и высокое качество обработанной поверхности. На методы ротационного хонингования, притирки с дозированным съемом материала поверхностного слоя и раскатывания с регулированием деформирующих усилий получены авторские свидетельства на изобретение.

Разработанные методы и результаты исследований могут быть успешно применены при обработке высокоточных деталей машин с целью обеспечения требуемых точностных, качественных и износостойких характеристик поверхностных слоев. Результаты проведенных работ рекомендованы для внедрения в производство.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гафаров А. М. Износостойкость тяжело нагруженных деталей машин и механизмов, эксплуатируемых в экстремальных условиях / А. М. Гафаров, П. Г. Сулейманов // *Технология машиностроения*. — 2011. — № 5. — С. 37–41.
2. Герасимова А. М. Анализ взаимодействия гидроабразивной струи с внутренней поверхностью канала фокусирующего сопла / А. М. Герасимова, А. Л. Галиновский, В. И. Колпаков // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. — 2015. — № 9 (666). — С. 59–67.
3. Гулиев С. М. Взаимодействие двоякопериодической системы инородных упругих включений и прямолинейных трещин с концевыми зонами при предольном сдвиге / С. М. Гулиев // *Теоретическая и прикладная механика*. — 2010. — № 2. — С. 72–79.
4. Гафаров А. М. Влияние технологических параметров на износ поверхностного слоя деталей машин, эксплуатируемых в экстремальных условиях / А. М. Гафаров, П. Г. Сулейманов, В. А. Гафаров // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. — 2013. — № 3. — С. 46–48.
5. Невзоров В. Н. Надежность машин и оборудования / В. Н. Невзоров, Е. В. Сучак. — Красноярск: Изд-во СГТУ, 1998. — 264 с.
6. Гафаров А. М. Прогрессивные методы механической обработки: в 2 т. / А. М. Гафаров. — Баку: Наука, 2001.
7. Гафаров А. М. Ротационное точение / А. М. Гафаров. — Баку: Наука, 2000. — 128 с.
8. Кравченко Б. А. Силы, остаточные напряжения и трение при резании металлов / Б. А. Кравченко. — Куйбышев: Куйбышевское кн. изд-во, 1962. — 180 с.
9. Пат. J20120090 Азербайджанская республика, ГКСМР (03.12.2010). Раскатная головка для обработки нежестких тонкостенных деталей / А. М. Гафаров, П. Г. Сулейманов; заяв. Академия МЧС Азербайджанской республики. — a20100270; заявл. 29.12.2010; опубл. 27.09.2012.
10. Гафаров А. М. Методика оценки надежности машин и оборудования, эксплуатируемых в экстремальных условиях / А. М. Гафаров, П. Г. Сулейманов, В. А. Гафаров // *Технология машиностроения*. — 2014. — № 7. — С. 40–44.
11. Солер Я. И. Обеспечение точности формы инструментов при плоском шлифовании кругом Horton Vitrim / Я. И. Солер, Нгуен Ван Кань // *Вестник машиностроения*. — 2016. — № 11. — С. 51–58.

### REFERENCES

1. Gafarov, A. M. and P. G. Suleimanov. "Iznosostoičnost' tyazhelonagruzhennykh detalei mashin i mekhanizmov, ekspluatiruemykh v ekstremal'nykh usloviyakh." *Tekhnologiya mashinostroeniya* 5 (2011): 37–41.
2. Gerasimova, Anastasia Mikhailovna, Andrey Leonidovich Galinovsky, and Vladimir Ivanovich Kolpakov. "Analysis of the Interaction between the Abrasive Jet Stream and the Inner Surface of the Jet Forming Nozzle." *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building* 9(666) (2015): 59–67.
3. Guliev, S. M. "Vzaimodeistvie dvoyakoperiodicheskoi sistemy inorodnykh uprugikh vklyucheni i pryamolineynykh treshchin s kontsevymi zonami pri predol'nom sdvige." *Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika* 2 (2010): 72–79.

4. Gafarov, A. M., P. G. Suleimanov, and V. A. Gafarov. "Vliyanie tekhnologicheskikh parametrov na iznos poverkhnostnogo sloya detalei mashin, ekspluatiruemykh v ekstremal'nykh usloviyakh." *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroyeniye* 3 (2013): 46–48.
5. Nevzorov, V. N., and E. V. Suchak. *Nadezhnost' mashin i oborudovaniy*. Krasnoyarsk: SGTU, 1998.
6. Gafarov, A. M. *Progressivnye metody mekhanicheskoi obrabotki*. Baku: Nauka, 2001.
7. Gafarov, A. M. *Rotatsionnoe tochenie*. Baku: Nauka, 2000.
8. Kravchenko, B. A. *Sily, ostatechnye napryazheniya i trenie pri rezanii metallov*. Kuibyshev: Kuibyshevskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1962.
9. Gafarov, A. M., and P. G. Suleimanov. The Republic of Azerbaijan J20120090, GKSMR (03.12.2010). Ras-katnaya golovka dlya obrabotki nezhestkikh tonkostennykh detalei. Publ. 27 Sept. 2012.
10. Gafarov, A. M., P. G. Suleimanov, and V. A. Gafarov. "Metodika otsenki nadezhnosti mashin i oborudo-vaniya, ekspluatiruemykh v ekstremal'nykh usloviyakh." *Tekhnologiya mashinostroyeniya* 7 (2014): 40–44.
11. Soler, Ya. I., and Van Kan' Nguen. "Assurance of tools form accuracy at plane grinding by Norton Vit-rium wheel." *Vestnik Mashinostroyeniya* 11 (2016): 51–58.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Гафаров Айдын Мамиш оглы** —  
доктор технических наук, профессор  
Азербайджанская Государственная морская  
академия  
1005, Азербайджанская Республика, Баку,  
ул. М. А. Расулзаде, 5  
e-mail: [Aydin.Qafarov@hotmail.com](mailto:Aydin.Qafarov@hotmail.com)  
**Алиев Чингиз Мансур оглы** —  
кандидат технических наук, доцент  
Азербайджанская Государственная морская  
академия  
1005, Азербайджанская Республика, Баку,  
ул. М. А. Расулзаде, 5  
e-mail: [C.Aliyev@caspar.az](mailto:C.Aliyev@caspar.az), [chingiz.aliyev@acsc.az](mailto:chingiz.aliyev@acsc.az)  
**Кулиев Алимардан Мамедрза оглы** —  
доцент  
Азербайджанская Государственная морская  
академия  
1005, Азербайджанская Республика, Баку,  
ул. М. А. Расулзаде, 5  
e-mail: [alimardan.quliyev@acsc.az](mailto:alimardan.quliyev@acsc.az)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Gafarov, Aydin M.** —  
Dr. of Technical Sciences, professor  
Azerbaijan State Marine Academy  
5 M.A. Rasulzada Str., Baku, 1005,  
Azerbaijan Republic  
e-mail: [Aydin.Qafarov@hotmail.com](mailto:Aydin.Qafarov@hotmail.com)  
**Aliyev, Chingiz M.** —  
PhD, associate professor  
Azerbaijan State Marine Academy  
5 M.A. Rasulzada Str., Baku, 1005,  
Azerbaijan Republic  
e-mail: [C.Aliyev@caspar.az](mailto:C.Aliyev@caspar.az), [chingiz.aliyev@acsc.az](mailto:chingiz.aliyev@acsc.az)  
**Guliyev, Alimardan M.** —  
Associate professor  
Azerbaijan State Marine Academy  
5 M.A. Rasulzada Str., Baku, 1005,  
Azerbaijan Republic  
e-mail: [alimardan.quliyev@acsc.az](mailto:alimardan.quliyev@acsc.az)

Статья поступила в редакцию 13 апреля 2017 г.  
Received: April 13, 2017.