

3. Підгаєцький М. М. Продукційний хонінгувальний верстат з адаптивно-програмним керуванням / М. М. Підгаєцький, К. К. Щербина, О. В. Лобода // Техніка в с/г виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Вип. 25. – Кіровоград, 2012.

4. Муратов К. Р. Эффективный метод хонингования прецизионных сквозных отверстий. Современные организационные, технологические и конструкторские методы управления качеством: сборник научных трудов / К. Р. Муратов. – Пермь: ГОУ ВПО ПГТУ, 2006. – С. 70-72.

УДК 629.113.011

А.П. Фалалеев, канд. техн. наук

Севастопольский национальный технический университет, г.Севастополь, Украина

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ЭВОЛЮЦИЮ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДВУХФАЗНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

Експериментально досліджено вплив температурних режимів кузовного ремонту на еволюцію прочностних характеристик деформаційно-упрочнених деталей із двофазної сталі DP980. Знайдені коефіцієнти емпіричної еволюційної залежності параметрів упрочнення від технологічних режимів ремонту. Показано, що для двофазної сталі спостерігається тенденція до зменшення міцності та зменшення роботи зміцнення при нагріві.

Ключевые слова: двофазная сталь, кузовной ремонт, деформационное упрочнение, технологический нагрев.

Експериментально досліджено вплив температурних режимів кузовного ремонту на еволюцію міцності деформаційно зміцнених деталей із двофазної сталі DP980. Знайдені коефіцієнти емпіричної еволюційної залежності параметрів зміцнення від технологічних режимів ремонту. Показано, що для двофазної сталі спостерігається значне зменшення міцності та зменшення роботи зміцнення в зв'язку з нагрівом.

Ключові слова: двофазна сталь, кузовний ремонт, деформаційне зміцнення, технологічний нагрів.

Influence of car body repair temperature to the strength of preliminary deformed parts produced from dual phase steel DP980 was experimentally investigated. Coefficients of empirical evolutionary function of strength on the technological regimes of repair were found. It is shown that for the dual phase steel there is a tendency of strength and hardening work decreasing due to the technological heating.

Key words: dual phase steel, car body repair, strength, deformational hardening, technological tempering, technological heating.

Двухфазные стали получили широкое распространение при изготовлении несущих деталей автомобильных кузовов, отвечающих за пассивную безопасность и поглощение энергии во время столкновения. Механические свойства подобных сталей зависят от термической обработки и от накопленной пластической деформации. В состоянии поставки сталь имеет низкий предел текучести, что позволяет изготавливать детали традиционными методами холодной штамповки, но при пластическом деформировании они значительно упрочняются.

Двухфазные стали получают путем неполной закалки малоуглеродистых сталей в области критических температур фазовых переходов, что формирует ферритно-мартенситную структуру. За счет распределения зерен мартенсита в ферритной матрице двухфазные стали имеют высокую степень упрочнения при деформации, позволяющую поглощать большее количество энергии при столкновении по сравнению с обыкновенными сталями.

Учитывая деформационную и температурную технологическую наследственность двухфазных сталей, при определении их механических свойств необходимо учитывать направления и величины приобретенной пластической деформации, предшествующие температуре и длительности нагрева.

Исследованию эволюции механических свойств двухфазных сталей в зависимости от накопленных пластических деформаций посвящены работы [1; 2]. В работах [2; 3] исследуется влияние температур закалки и отпуска на прочность и пластичность двухфазных сталей. Авторами отмечается существенное изменение величины упрочнения, которое связано с объемом мартенситной фазы в микроструктуре полученной стали. В работах [3, 4]

демонстрируется значительная деградация твердости в зоне термического нагрева при выполнении лазерной сварки. В работе [4] исследовано изменение свойств сталей после воздействия нагрева. Несмотря на большой объем работ, посвященных исследованию влияния нагревов на свойства двухфазных сталей в условиях массового производства, нерассмотренным остается вопрос эволюции механических свойств двухфазных сталей в условиях ремонтного производства. Особенностью ремонтного производства является большие накопленные пластические прямые и обратные деформации, кратковременность температурных воздействий, неизотермические условия нагрева и множество возмущающих воздействий случайного характера. Взаимное влияние пластических деформаций и нагревов на поведение двухфазных сталей является основным вопросом исследования.

Целью работы является исследование влияния температуры технологического нагрева деталей при выполнении кузовного ремонта автомобиля, на эволюцию механических свойств предварительно деформированных двухфазных сталей.

Методика исследования. Для исследования влияния термического воздействия на свойства двухфазной стали проводились испытания образцов на растяжение после остывания при нагревах с разной выдержкой. Образцы укладывались в прогретую муфельную печь на 20 с, 5 мин. и 20 мин., затем охлаждались на воздухе. Выдержка 20 с была выбрана экспериментально для используемых образцов, с учетом, что за это время образцы успевали нагреваться до температуры испытания так, что выдержка при пиковой температуре составляла не более 2 с. Образцы нагревались и выдерживались при температурах 300 °С, 450 °С, 600 °С. После охлаждения образцы растягивались, при этом снималась кривая напряжение – деформации. Образцы растягивали при комнатной температуре на универсальной разрывной машине со скоростью 0,001 с⁻¹. Деформация в процессе испытания измерялась при помощи экстензометров на длине 25 мм. По диаграмме определялись предел текучести, предел прочности, максимальное удлинение до разрушения. Предел текучести определялся при деформации 0,2 %.

Для испытаний использовались образцы двухфазной стали DP980 производителя Тата-стил толщиной 1,2 мм с гальваническим покрытием с химическим составом (С – 0,15; Mn – 1,50; Si – 0,31; Al – 0,05; Mo – 0,006; Cr – 0,02; Cu – 0,02; S – 0,006; P – 0,01). Для исследования воздействия температуры на накопленную пластическую деформацию часть образцов предварительно растягивались до значения остаточной деформации 8 %.

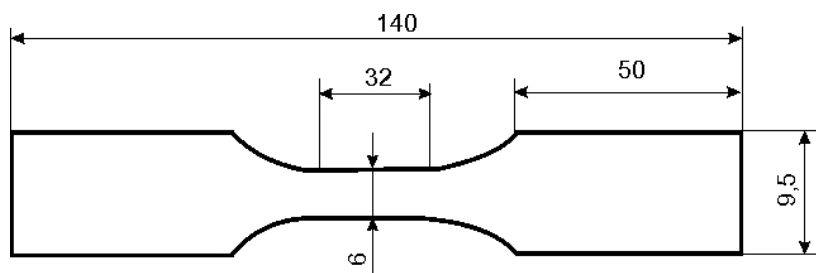


Рис. 1. Образец для испытаний на растяжение

Для исследования на растяжение использовались образцы в соответствии со стандартом ASTM-E08. Геометрия образцов приведена на рисунке 2. Окончательная подготовка поверхности образцов проводилась абразивной шкуркой в направлении растяжения зернистостью 600.

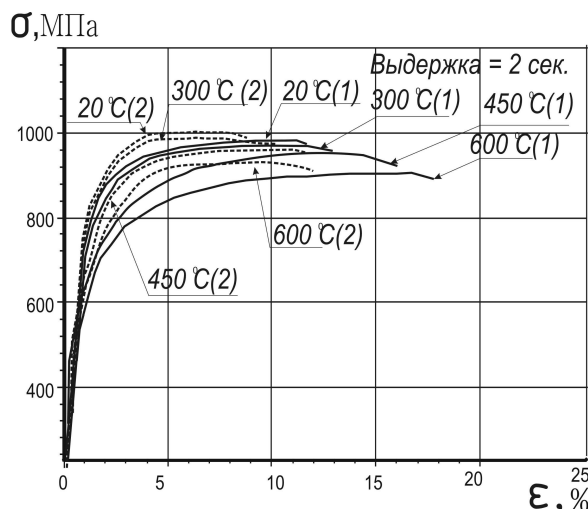


Рис. 2. Диаграммы растяжения стали DP980 после нагрева, выдержке 2 секунды и последующего охлаждения до температуры 20 °С, пунктирные линии с индексом (2) – предварительно на 8 % растянутые образцы, сплошные линии с индексом (1) – сталь в состоянии поставки

Влияние температуры нагрева и накопленной пластической деформации на механические свойства двухфазной стали.

Предварительная пластическая деформация образцов привела к их упрочнению и уменьшению запаса пластической деформации (рис. 3, пунктирная линия). Предварительные деформации образцов и деформации во время испытания имели одинаковое направление (растяжение), поэтому предварительное упрочнение вызвало увеличение предела пластичности и предела прочности, что видно из сравнения пунктирных графиков и графиков сплошной линией (рис. 3). Такое поведение является типичным для двухфазных сталей и наблюдается как на этапе производства, так и во время смятия кузова при столкновении. При нагреве недеформированных образцов наблюдается деградация их механических свойств. Кратковременный нагрев предварительно деформированных образцов также вызывает деградацию прочности. По мере уменьшения предела прочности наблюдается рост максимального удлинения, что для предварительно деформированных образцов является положительным, так как увеличивает запас по остаточной деформации, необходимой для выполнения ремонтных операций и для обеспечения пассивной безопасности отремонтированного автомобиля.

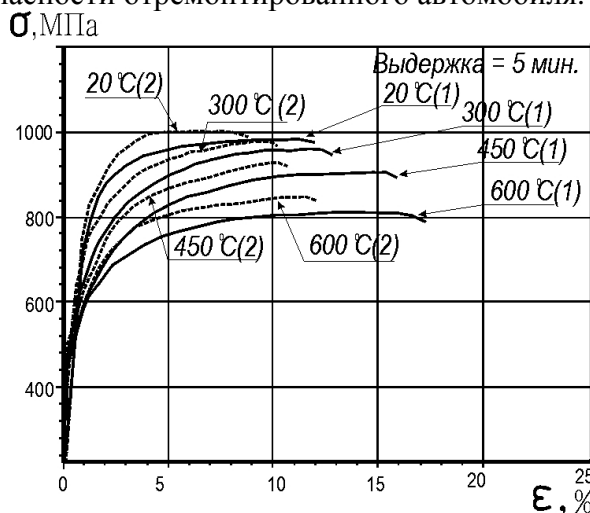


Рис. 3. Диаграммы растяжения стали DP980 после нагрева, выдержке 5 минут и последующего охлаждения до температуры 20 °С, пунктирные линии с индексом (2) – предварительно на 8 % растянутые образцы, сплошные линии с индексом (1) – сталь в состоянии поставки

При выдержке 5 минут (рис. 4) диаграммы растяжения демонстрируют усиление деградации свойств по сравнению с выдержкой 2 секунды при тех же температурах нагрева. Предварительно деформированные образцы имеют ту же тенденцию к увеличению предела деформируемости и уменьшению предела прочности. По сравнению с образцами в состоянии поставки, предварительно деформированные образцы продолжают демонстрировать более высокие напряжения при деформации.

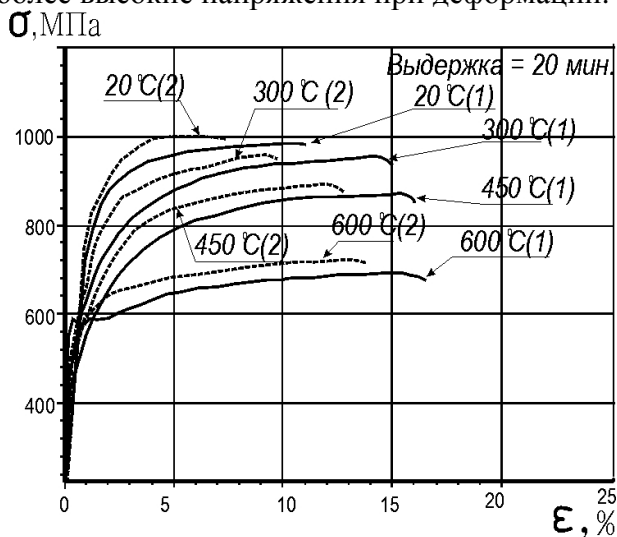


Рис. 4. Диаграммы растяжения стали DP980 после нагрева, выдержке 20 минут и последующего охлаждения до температуры 20 °С, пунктирные линии с индексом (2) – предварительно на 8 % растянутые образцы, сплошные линии с индексом (1) – сталь в состоянии поставки

Графики напряжение-деформация при всех значения технологической выдержки представляли собой семейства расположенных друг под другом характеристик с максимальным значением, не выходящим за пределы графика при предыдущей температуре испытания. Значительное увеличение максимальной деформации (на 9 %) наблюдалось при первой температуре испытания 300 °С (рис. 4, 5). При дальнейшем увеличении температуры изменение величины деформации лежало в пределах погрешности измерения для выдержек 5 и 20 мин. При 2 секундной выдержке (рис. 3) происходил последовательный рост величины максимального удлинения до 8-9 %, что подтверждает предположение о том, что увеличение максимальной пластической деформации наблюдается за счет релаксации напряжений при нагревах до 300 °С в пределах 8-10 %. При незначительной выдержке времени для снятия напряжения во всем объеме материала недостаточно, поэтому при температурах выше 300 °С продолжает наблюдаться увеличение максимального удлинения, но в пределах 10 %.

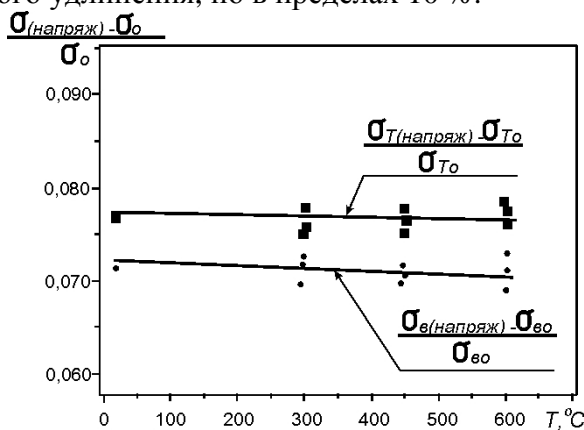


Рис. 5. Эволюция деформационного упрочнения при технологических нагревах

При выдержке 20 минут при температуре 600 °С предварительно деформированные образцы демонстрируют диаграмму растяжения, схожую с недеформированными образцами, но величина максимального удлинения, по-прежнему, меньше на 6 %.

Анализ диаграмм растяжения (рис. 3, 4, 5) показал, что предел прочности стали последовательно снижается с увеличением температуры и выдержки. Хотя представленные данные продемонстрировали зависимость свойств стали от объема тепловой энергии, поглощенной металлом, но следует отметить, что анализ результатов экспериментов, не вошедших в данную статью показывает, что график 600 °С (1) (рис. 4) является предельным графиком насыщения и дальнейшее увеличение времени выдержки не приводило к существенным отличиям от него.

Анализ значения предела прочности, который демонстрировали образцы при растяжении, показывает, что температура нагрева приводит к уменьшению этих значений, причем пропорционально длительности нагрева.

Это доказывает, что 20 минутной выдержки достаточно для протекания равновесных процессов и этот режим можно считать изотермическим, в то время как нагрев с выдержками до 20 мин. можно считать неизотермическими и протекающие процессы носят незавершенный характер. Для незавершенных состояний актуальным будет вопрос устойчивости достигнутого состояния, полученных свойств и влияние на них процессов дальнейшего старения.

Технологический нагрев деструктивно воздействовал также и на образцы, которые предварительно были подвержены деформации, но при этом не оказал воздействия на деформационное упрочнение (рис. 6).

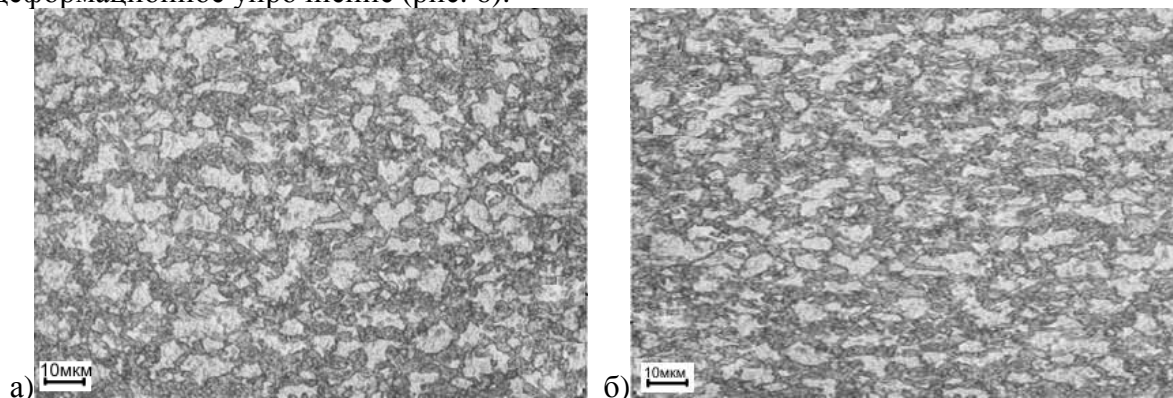


Рис. 6. Микроструктура стали DP980 в состоянии поставки:
а) – деформированная; б) – (увеличение - $\times 1000$)

Во всем диапазоне исследуемых температур (300-600 °С) и выдержек (0-20 мин.) доля упрочнения, вызванного накопленной пластической деформацией оставалось практически постоянной (6,9-7,3 %). При таком поведении двухфазной стали в исследуемом диапазоне температур, деформационное упрочнение можно считать независимым от температурного влияния.

Микроструктура базового металла (рис. 7, а) состоит из мартенситных зерен (темные участки), равномерно распределенных в ферритной основе (светлые участки). Сталь DP980 содержит большое количество мартенсита (более 60 %), что определяет ее высокую прочность. При деформации ферритные зерна первыми претерпевают изменение. Это видно по микроструктуре растянутого металла (рис. 7, б).

После нагрева, в исследуемом диапазоне температур, изменений размеров и формы зерен не наблюдалось как для деформированного, так и для обычного материала. Это объясняет слабую чувствительность деформационного упрочнения к температурному влиянию. Под воздействием температуры часть мартенсита в зернах трансформируется

в отпущенный мартенсит, что приводит к уменьшению предела прочности, но одновременно с этим происходит осаждение карбидов, создавая дополнительные препятствия движению дислокаций и увеличивая предел пластичности.

Независимость упрочнения от температурного влияния позволяет моделировать пластичность и прочность по принципу суперпозиции, разделяя различные механизмы эволюции механических свойств. Для деформационного упрочнения двухфазной стали в работе [5] предлагается комбинированная феноменологическая модель на основе законов Людвига и Хокет-Шерби:

$$\sigma = \beta[K(\varepsilon^P)^n] + (1 - \beta)[R_0 - (R_0 - B)\exp(-a(\varepsilon^P)^v)], \quad (1)$$

где β – комбинирующий фактор, ε^P – пластическая деформация, R_0 – предел прочности стали, K, n, B, a, v – эмпирические коэффициенты. Находя коэффициенты для стали DP980 методом наименьших квадратов, уравнение (1) запишем в виде

$$\sigma = 0,6[1280(\varepsilon^P)^{0,15}] + (1 - 0,6)[980 - (980 - 350)\exp(-10,88(\varepsilon^P)^{0,68})]. \quad (2)$$

Разупрочнение, вызванное ремонтными нагревами, удобно описать [6] эмпирическим уравнением

$$\sigma = R_0 - B_1(B_2 + B_3 \cdot t^{0,6}) \left(\frac{T}{T_{AC1}} + B_4 \right)^{8,2}, \quad (3)$$

где T – температура технологического нагрева, T_{AC1} – первая критическая температура фазового перехода (точка AC_1 диаграммы состояния железо-углерод), t – время выдержки при максимальной температуре, секунды, B_1, B_2, B_3, B_4 – постоянные, определяемые экспериментально.

Тогда для стали DP980 окончательно можем записать

$$\sigma = 768(\varepsilon^P)^{0,15} + 0,4[980 - 630\exp(-10,88(\varepsilon^P)^{0,68})] - 3,27(0,037 + 0,002 \cdot t^{0,6}) \left(\frac{T}{724} + 1,27 \right)^{8,2}. \quad (4)$$

Уравнение (4) учитывает деформационное упрочнение и влияние технологических нагревов. Использование его в комплексной теории пластичности, например, такой как Шабоша, позволяет моделировать поведение двухфазной стали во время ремонта, учитывая сложно-напряженное состояние, накопленную пластическую деформацию, кинематическое упрочнение, температурное воздействие во время технологических операций.

Выводы. Исследовано взаимное влияние накопленной пластической деформации и технологических температурных воздействий на эволюцию свойств двухфазных сталей. Установлено, что деформационное упрочнение сохраняется при воздействии температуры в диапазоне до критических температур фазовых переходов. Такое поведение можно объяснить тем, что зерна в этом диапазоне температур сохраняют свою форму и расположение. Деградация предела прочности стали при воздействии нагревов вызвана незначительным отпуском мартенсита в существующих зернах. При этом несколько повышаются напряжения наступления текучести, в связи с осаждением карбидов по границам мартенситных зерен, что препятствует свободному движению дислокаций.

Даже кратковременный нагрев до температур, сравнимых с критическими температурами фазовых переходов, приводит к деградации свойств стальных конструкций. Это обуславливает необходимость планирования и контроля температуры во время ремонта. Сварочные операции необходимо выполнять по технологии прерывистого шва, с паузами для охлаждения, причем длина швов должна рассчитываться исходя из величины допустимого ослабления. При соединении деталей предпочтение следует отдавать методам с температурами нагрева до критических значений фазовых переходов, таким как высокотемпературная пайка.

Для стали DP980 получена феноменологическая модель эволюции прочностных характеристик, которая одновременно учитывает влияние деформационного упрочнения, технологической температуры нагрева и технологической выдержки при пиковой температуре. Уравнение (4) позволяет проектировать операции ремонта, рассчитывать длину сварочных швов, прогнозировать прочностные характеристики деталей после ремонта.

Интерес дальнейшего исследования представляют величина допустимого ослабления деталей из расчета обеспечения заданного уровня пассивной безопасности, а так же критерии неразрушающего контроля качества ремонта, позволяющие определить текущие свойства стали кузова после ремонта с неизвестными режимами.

Список использованных источников

1. Огородников В. А. Приложение метода определения напряженно-деформированного состояния в пластической области измерением твердости деформированного металла к решению задач технологической механики / В. А. Огородников // Вопросы механики и физики процессов резания и холодного пластического деформирования: сборник научных трудов института сверхтвердых материалов НАН Украины. Серия Г: Процессы механической обработки. – К., 2012. – С. 359-366.
2. Byun T.S. Tensile Properties and Inhomogeneous Deformation of Ferrite-Martensite Dual-Phase Steels / Byun T.S., Kim I.S. // Journal of Materials Science, 28. – 1993. – p. 2923-2932.
3. Erdogan M., The Effect of New Ferrite Content on the Tensile Fracture Behaviour of Dual Phase Steels, Journal of Materials Science, 37. – 2002. – p. 3623-3630.
4. Bag A. Influence of Martensite Content and Morphology on Tensile and Impact Properties of High-Martensite Dual-Phase Steels/ Bag A., K.K. Ray, E.S. Dwarakadasa// Metallurgical and Materials Transactions A, 30. – 1999. – p. 1193-1202.
5. Фалалеев А. П. Моделирование поведения двухфазных сталей на операциях холодной ремонтной вытяжки кузовов автомобилей / А. П. Фалалеев // Наукові нотатки ЛНТУ: зб. наук. праць. Вип.12. – Луцьк, 2012. – С. 85-92.
6. Фалалеев А. П. Влияние температурных режимов кузовного ремонта на эволюцию механических свойств двухфазных автомобильных сталей / А. П. Фалалеев // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту ДонНТУ: науково-виробн. зб. Вип. 13. – Донецьк, 2012. – С. 56-64.

УДК 621.822.172:621.7.079

Д.Ю. Федориненко, канд. техн. наук

О.А. Плівак, асистент

С.В. Майданюк, асистент

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТОЧНОСТІ РЕГУЛЬОВАНОЇ ГІДРОСТАТИЧНОЇ ВТУЛКИ ШПИНДЕЛЬНОГО ПІДШИПНИКА

Запропонована нова конструкція гідростатичної втулки регульованої радіальної опори шпинделя. Розроблена методика вимірювання показників точності опорної поверхні гідростатичної втулки з урахуванням особливостей її будови. Здійснено спектральний аналіз точності контуру опорної поверхні гідростатичної втулки. Визначені статистичні характеристики амплітуд та початкових фаз спектра опорної поверхні втулки. Встановлені закономірності формування амплітуд гармонік спектра контуру опорної поверхні залежно від технології виготовлення втулки.

Ключові слова: точність, гідростатична втулка, спектральний аналіз, технологія виготовлення.

Предложена новая конструкция гидростатической втулки регулируемой радиальной опоры шпинделя. Разработана методика измерения показателей точности опорной поверхности гидростатической втулки с учетом особенностей ее строения. Осуществлен спектральный анализ точности контура опорной поверхности гидростатической втулки. Определены статистические характеристики амплитуд и начальных фаз спектра опорной поверхности втулки. Установлены закономерности формирования амплитуд гармоник спектра контура опорной поверхности в зависимости от технологии изготовления втулки.

Ключевые слова: точность, гидростатическая втулка, спектральный анализ, технология изготовления.

The new construction of the regulable hydrostatic bush of spindle radial support is offered. The method of measuring of hydrostatic bush base surface exactness indexes is developed taking into account the features of its structure. The spectrology of exactness is carried out to the contour of hydrostatic bush base surface. Statistical descriptions of bush