

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УСТАНОВОК ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ

©2011 А. В. Карпов

Самарский государственный технический университет

В статье рассмотрены основные конструкции запатентованных установок для реализации процесса термопластического упрочнения (ТПУ) лопаток газотурбинных двигателей и газоперекачивающих агрегатов.

Термопластическое упрочнение; установки для термопластического упрочнения; режим упрочнения; лопатки газотурбинных двигателей и газоперекачивающих агрегатов.

Термопластическое упрочнение (ТПУ) деталей газотурбинных двигателей уже давно получило широкое распространение в авиационной, и, что немаловажно, в условиях современных рыночных отношений, в газодобывающей промышленности. Способ термопластического упрочнения заключается в нагреве детали до температуры начала термопластических деформаций с последующим резким спрейерным охлаждением [1-3].

Установки термопластического упрочнения предназначены для термоупрочнения ответственных деталей (лопаток, дисков) газотурбинных двигателей ГТД как новых, так и ремонтных.

Область их применения распространяется на большую номенклатуру различных лопаток газотурбинных комплексов, термоупрочняемых с целью увеличения их усталостной прочности и долговечности.

Одной из первых установок для термопластического упрочнения лопаток ГТД следует считать установку с использованием конвективного нагрева (рис. 1), разработанную авторами [1]. Термоупрочнение производилось в следующей последовательности. Упрочняемая лопатка хвостовиком укрепляется в держателе, который соединен со штангой. При нагреве лопатка вводится в печь вместе с держателем хвостовика, после чего отверстие прикрывается изолирующими шторами. Вся система удерживается чекой. После достижения нагрева лопатки заданной температуры открываются изолирующие шторы и освобождается чека. Вся система под собственным весом быстро

опускается в охлаждающую камеру. Перед тем как освободить чеку, открывается кран подачи жидкости. Таким образом, лопатка попадает в камеру под спрейерное охлаждение. Давление в системе поддерживается постоянным на уровне 0,5 МПа.

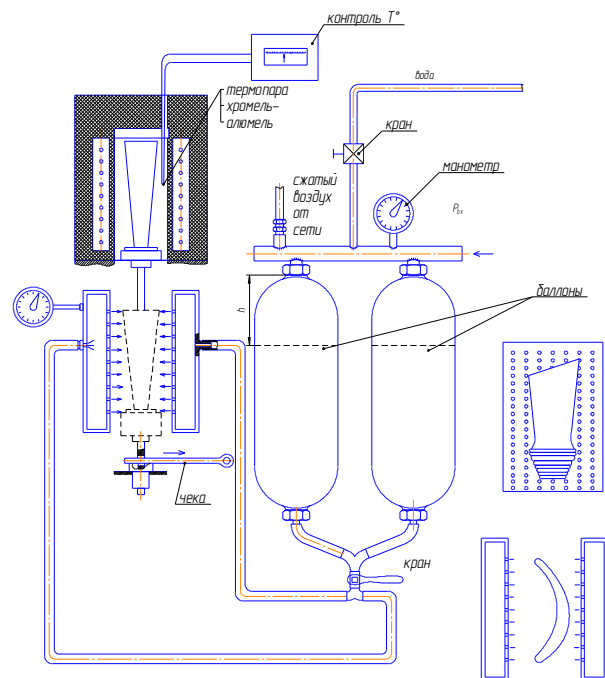


Рис. 1. Схема установки ТПУ с использованием электропечи

Обычно разница давлений в полостях камеры и баллонов не превышала $\Delta P=0,1-0,3$ МПа. Исследование температурного поля по длине пера лопатки показывало, что перепад температуры находится в пределах 30°C .

Установка состоит из электропечи типа МП2УМ, охлаждающей камеры, двух бал-

лонов для жидкости (воды) и системы подвода сжатого воздуха. Электродпечь установлена таким образом, чтобы ее нагревательная полость отверстием была обращена вниз. Для создания равномерного теплового поля внутренняя часть печи армирована сталью 1Х18Н9Т. Охлаждающая камера с двух сторон имеет спрейерные решетки с отверстиями с шагом $a=5,0$ мм, диаметр отверстий 0,8 мм. Жидкость к каждой спрейерной решетке поступает отдельно. Давление в камере контролируется манометром. Подвод жидкости осуществляется от двух баллонов, в которые перед упрочнением заливается вода. Давление жидкости в баллонах создается от системы со сжатым воздухом. В процессе нагрева температура в печи непрерывно контролируется потенциометром. Для градуировки печи использовались специально препарированные лопатки, в которые по высоте закладывался ряд термпар. Основным недостатком конструкции данной установки следует считать незамкнутую систему охлаждения

В рамках хозяйственной работы «Внедрение установки и метода термопластического упрочнения лопаток ГТК в производство» между ГОУ ВПО СамГТУ и ООО «Самаратрансгаз», проходившей в 1999 – 2001 гг. на производственно-техническом предприятии "СамараГазЭнергоРемонт" была внедрена установка для ТПУ [2] с замкнутой системой охлаждения, принципиальная схема которой показана на рис. 2.

Для реализации процесса ТПУ на установке, приведенной на рис. 2, необходимо, чтобы давление воды в камерах охлаждения было $P_{ном}=0,48...0,54$ МПа, а давление воздуха в баллоне $P_{бал}=0,54...0,60$ МПа. Отклонения указанных величин должны находиться в диапазоне $\pm 0,025$ МПа. Температура нагрева может устанавливаться в зависимости от материала детали в пределах 600–800°C при отклонении +20°C. Для контроля давления применяются манометры, а для контроля температуры – термпары.

Термопластическое упрочнение лопатки начинается с заполнения баллона водой с последующей установкой лопатки в печь для нагрева.

Заполнение ёмкости водой происходит переводом крана 6 в положение «открыт».

После этого вода самотёком из центральной системы начинает поступать в баллон. Во избежание засорения спрейерных решёток 27, предназначенных для более интенсивного охлаждения детали, вода для охлаждения очищается от механических примесей путем установки сетчатого фильтра.

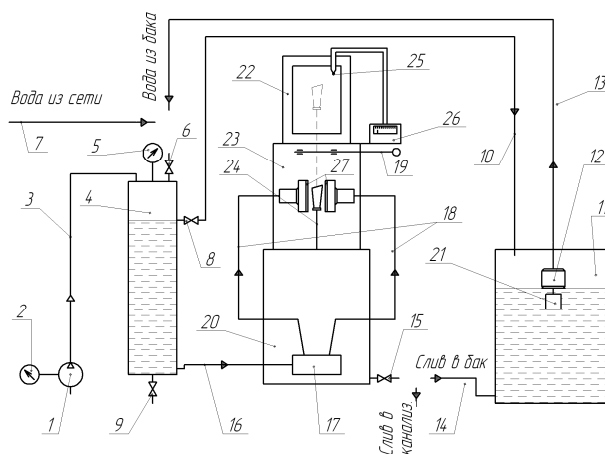


Рис. 2. Принципиальная схема установки для ТПУ

Одновременно с этим необходимо открыть кран 8 в боковой части баллона, чтобы вода беспрепятственно заполняла его и не создавалась воздушная пробка. Гидрораспределитель 17 должен быть открыт, чтобы вода при заполнении баллона 4 на заданный уровень имела возможность по шлангам 16, 18, соединенным между собой гидрораспределителем кранового типа 17, вытекать через отверстия в решетках 27 камеры охлаждения 23. Прохождение воды через отверстия в решетках 27 камеры охлаждения 23 свидетельствует о требуемом заполнении водой системы охлаждения установки, поэтому подачу воды следует прекратить переводом гидрораспределителя кранового типа 17 в положение «закрыт». Проходное сечение гидрораспределителя 17 должно быть не меньше сечения трубопровода, на котором он установлен. Площадь проходного сечения каждого трубопровода, подводящего воду к камере охлаждения, должна в 4 и более раз превышать суммарную площадь всех выходных отверстий ($d_{отв}=0,8$ мм) на соответствующей спрейерной решетке 27 камеры охлаждения.

При отсутствии центральной магистрали 7 снабжение водой ресивера 4 возможно с применением насоса 12 с подачей воды из

ёмкости 11. Для контроля давления в баллоне 4 и компрессоре 1 установлены манометры 5 и 2 (Ф160-10-1). После достижения необходимого давления компрессор 1 отключается. При этом распределитель кранового типа 17, установленный на выходном из баллона шланге 16, переведён в положение «закрыт».

Для перемещения лопатки в зону нагрева необходимо установить её в специальный держатель, расположенный в верхней части подвижного штока 24, и поднять шток в соответствующее для нагрева лопатки положение. Перед установкой лопатки в печь специальная задвижка 19, установленная в нижней части муфельной печи, отодвигается до фиксации. Задвижка устраняет охлаждение нижней части печи, которое возможно в случае её отсутствия, и предохраняет печь от попадания в неё воды в момент охлаждения нагретой лопатки.

Перед окончанием времени нагрева краны 6 и 8 закрываются и включается компрессор 1 для создания в верхней части баллона 4 с водой соответствующего давления. Манометр 5, установленный в верхней части баллона 4, регистрирует в нём давление воздуха (0,54...0,60 МПа). По достижении указанного давления компрессор выключается. Объём сжатого воздуха над уровнем воды в баллоне должен обеспечить длительность охлаждения при заданном давлении на входе в решетки камеры охлаждения в течение 2...3 с. По окончании времени нагрева открывается кран 17, стоящий на выходе из ёмкости с водой. Вода под давлением поступает в камеру охлаждения и через отверстия в спрейерных решетках 27 попадает в зону охлаждения. Одновременно с этим фиксатор 19 выводится из отверстия в штоке, который вместе с нагретой деталью под собственным весом быстро опускается в охлаждающую камеру 23, где лопатка попадает под струи воды, выходящие под давлением из отверстий решеток. Через 1...3 с. процесс охлаждения заканчивается и лопатка через специальное окно с дверцей на лицевой стороне установки вынимается из держателя на штоке. Затем устанавливается другая лопатка и процесс термомпластического упрочнения повторяется.

В производственных условиях необходимо обеспечить бесперебойный цикл упрочнения лопаток ГТД, поэтому была предложена установка для поточного упрочнения лопаток ГТД [3], принципиальная схема которой показана на рис. 3.

Установка для термомпластического упрочнения деталей работает следующим образом: лопатка 1 устанавливается в направляющие 33. Толкателем 2 при открытой задвижке 32 деталь перемещается по направляющей 30 внутри электрической муфельной печи тоннельного типа 31, после чего задвижка 32 закрывается. Электропечь оснащена терморпарой 28 и температурным реле 29. При достижении необходимой температуры автоматически открывается задвижка 26 и захватом 24 деталь перемещается до неподвижного упора 25. При касании упора освобождается от захвата 24 и свободно падает вниз под действием собственного веса. При этом закрывается задвижка 26 и открывается задвижка 23 на входе в кольцевой спрейер 21.

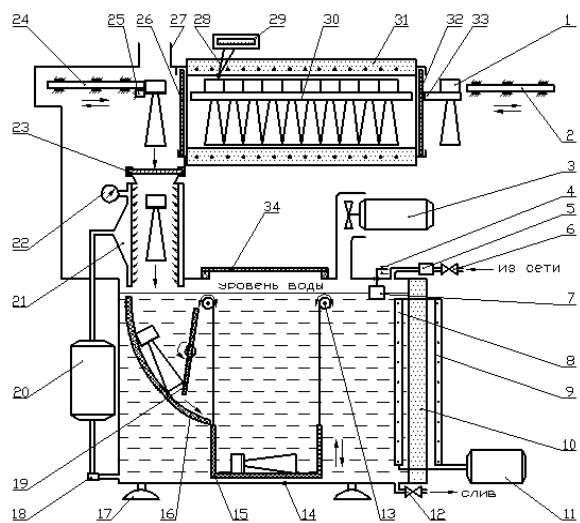


Рис. 3. Схема установки для ТПУ:

- 1 - лопатка, 2 - толкатель, 3 - вентилятор,
- 4 - конечный выключатель, 5 - фильтр,
- 6, 12 - кран, 7 - поплавок, 8 - испаритель,
- 9 - конденсатор, 10 - теплоизоляция,
- 11 - компрессор, 13 - блок, 14 - емкость,
- 15 - контейнер, 16 - эластичный склиз,
- 17 - виброопора, 18 - фильтр,
- 19 - эластичный толкатель, 20 - насос высокого давления, 21 - кольцевой спрейер, 22 - манометр, 23 - задвижка, 24 - захват, 25 - неподвижный упор, 26, 32 - задвижка, 27 - отводная труба, 28 - терморпара, 29 - температурное реле, 30, 33 - направляющая, 31 - электропечь, 34 - крышка люка

В кольцевой спрейер 21 во время свободного падения детали подается охлаждающая жидкость из емкости 14 через фильтр 18 насосом высокого давления 20. Давление охлаждающей жидкости составляет 0,8-1 МПа и регулируется автоматически. Для визуального контроля давления охлаждающей жидкости служит манометр 22. В установке для термопластического упрочнения спрейер представляет собой полую регулируемую конструкцию, выполненную и виде кольцевой ёмкости, которая позволяет равномерно охлаждать все поверхности упрочняемой детали. В кольцевом спрейере 21 отверстия расположены таким образом, чтобы движение охлаждающей жидкости было направлено навстречу движению упрочняемой детали и сбивало паровую рубашку. Для выхода пара при упрочнении в конструкции установки предусмотрена отводная труба 27. Угол наклона струй к траектории падения лопатки в кольцевом спрейере составляет от 90° до 45° и определяется в зависимости от размера и конфигурации детали опытным путем. Охлаждение в кольцевом спрейере 21 происходит при свободном падении детали, что позволяет более качественно и равномерно упрочнить все поверхности детали. Деталь после упрочнения в процессе свободного падения внутри кольцевого спрейера 21 попадает на эластичный склиз 16, после чего эластичным толкателем 19 перемещается в контейнер 15. В этом контейнере происходит окончательное охлаждение детали. Затем деталь в контейнере с помощью блоков 13 автоматически поднимается к открывающейся крышке люка 34. Упрочненная деталь эвакуируется оператором, после чего контейнер 15 опускается вниз и закрывается крышка люка 34. На этом цикл упрочнения детали заканчивается.

Для замкнутого цикла процесса служит система фильтрации, охлаждения и контроля уровня охлаждающей жидкости. Она состоит из крана 6, фильтра 5, поплавка 7 и конечных выключателей 4, при этом автоматически поддерживается необходимый уровень охлаждающей жидкости. Фильтр 18, установленный между емкостью 14 и насосом высокого давления 20, предотвращает

загрязнение охлаждающей жидкости при подаче в кольцевой спрейер 21.

Для охлаждения жидкости служит вентилятор 3 и криогенная установка, состоящая из компрессора 11, испарителя 8 и конденсатора 9, разделенных теплоизоляцией 10. При температуре окружающей среды ниже 20°С для охлаждения жидкости может быть достаточно работы вентилятора 3. При температуре окружающей среды выше 20°С автоматически включается криогенная установка, снижающая температуру охлаждающей жидкости до 20°С.

Через определенное количество циклов упрочнения отработанная охлаждающая жидкость сливается через кран 12 и обновляется из сети через кран 6 и фильтр 5. Для снижения уровня вибраций установки служат четыре виброопоры 17.

В рассмотренных конструкциях установок для ТПУ система охлаждения является нерегулируемой или частично регулируемой, как в предыдущей конструкции установки (рис. 3), что не позволяет получать максимальные значения коэффициента теплоотдачи. Поэтому авторами [4] была предложена новая конструкция установки с регулируемой системой охлаждения, показанная на рис. 4.

Основной отличительной особенностью данной установки от установки, показанной на рис. 3, является камера охлаждения, которая состоит из четырех спрейерных решеток охлаждения; насадок, регулирующих размеры отверстий спрейерных решеток охлаждения; направляющих для фиксации угла наклона нижних спрейерных решеток охлаждения; салазок для горизонтального перемещения верхних спрейерных решеток охлаждения.

В зависимости от формы и размеров упрочняемой детали спрейерные решетки охлаждения 24 можно регулировать, верхние с помощью салазок для горизонтального перемещения 25, нижние – направляющих для фиксации угла наклона 23. Для эффективного удаления паровой рубашки охлаждающей жидкостью с упрочняемой поверхности детали необходимо достичь эффекта задержки детали (0,5 – 1,5 секунды) между спрейерными решетками охлаждения 24.

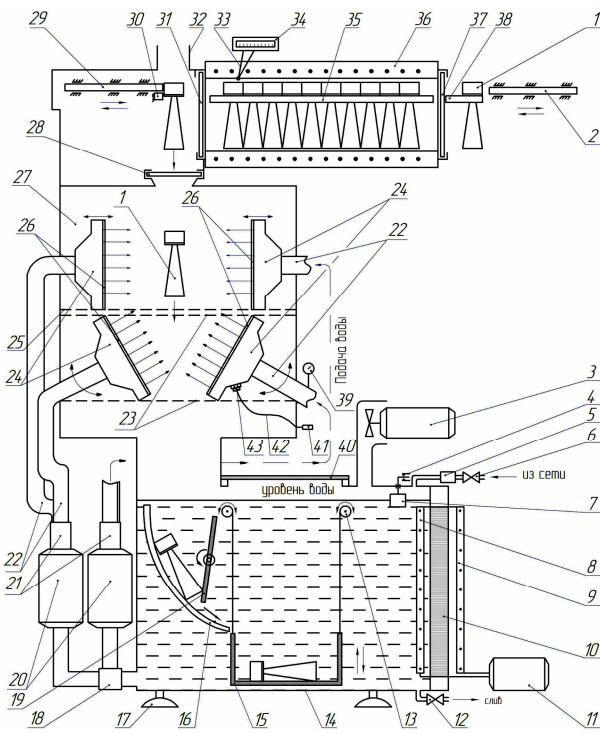


Рис. 4. Схема установки ТПУ с регулируемой системой охлаждения:

- 1 - деталь, 2 - толкатель, 3 - вентилятор,
- 4 - конечный выключатель, 5 - фильтр, 6, 12 - кран,
- 7 - поплавок, 8 - испаритель, 9 - конденсатор,
- 10 - теплоизоляция, 11 - компрессор, 13 - блок,
- 14 - емкость, 15 - контейнер, 16 - эластичный склиз, 17 - виброопора, 18 - фильтр,
- 19 - эластичный толкатель, 20 - насосы высокого давления (НВД), 21 - переходник для шлангов,
- 22 - шланги для подачи воды, 23 - направляющие для фиксации угла наклона нижних спрейерных решеток охлаждения, 24 - спрейерные решетки охлаждения, 25 - салазки для горизонтального перемещения верхних спрейерных решеток охлаждения,
- 26 - насадки, регулирующие размеры отверстий спрейерных решеток охлаждения, 27 - камера охлаждения, 28 - задвижка камеры охлаждения,
- 29 - захват, 30 - неподвижный упор,
- 31, 37 - задвижка печи, 32 - отводная труба,
- 33 - терморпара, 34 - температурное реле,
- 35, 38 - направляющая, 36 - электропечь, 39 - манометр, 40 - крышка люка, 41 - прибор, регистрирующий температуру охлаждающей жидкости,
- 42 - изолированный провод, соединяющий датчик температуры охлаждающей жидкости и прибор, регистрирующий температуру охлаждающей жидкости, 43 - датчик температуры охлаждающей жидкости

Для достижения этого нижние спрейерные решетки охлаждения с помощью направляющих для фиксации угла наклона 23 способны изменять угол наклона относительно траектории падения лопатки от 0 до 75°, что определяется в зависимости от раз-

меров и конфигурации детали эмпирическим путем. В конструкцию спрейерных решеток охлаждения входят насадки, регулирующие размеры отверстий решеток охлаждения 26, с помощью которых регулируется объем подаваемой охлаждающей жидкости. Отверстия спрейерных решеток охлаждения могут иметь различную форму, наиболее технологичная форма равностороннего треугольника. Размеры проходных сечений отверстий спрейерных решеток охлаждения, регулируемые насадкой 3, изображенной на рис. 5, изменяются в зависимости от формы, габаритных размеров, массы упрочняемых деталей. Температура охлаждающей жидкости фиксируется с помощью прибора 41, регистрирующего температуру охлаждающей жидкости посредством датчика 43. Режим упрочнения на установке определяется исходя из размеров, формы, а также физико-механических свойств упрочняемых деталей.

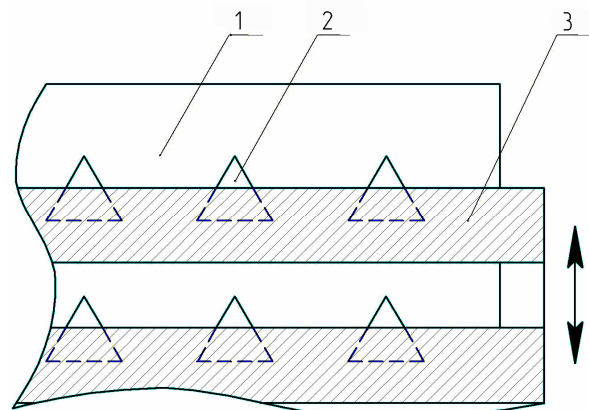


Рис. 5. Регулировка размеров отверстий спрейерных решеток охлаждения:

- 1-спрейерная решетка охлаждения, 2-отверстия спрейерной решетки охлаждения, 3-насадка, регулирующая размеры отверстий спрейерных решеток охлаждения

Выводы

1. Рассмотрены основные конструкции запатентованных установок для термопластического упрочнения лопаток ГТД, в которых передача тепла осуществляется конвекцией.

2. В производственных условиях, где необходимо обеспечить бесперебойный цикл упрочнения лопаток ГТД, рекомендуется использовать установки, показанные на рис. 3, 4.

3. Формирование остаточных напряжений в большей степени зависит от скорости охлаждения упрочняемой поверхности, которая определяется коэффициентом теплоотдачи. При термоупрочнении жаропрочных сплавов он должен быть не ниже ($\alpha = 1,5 \cdot 10 - 2,5 \cdot 10$) 10^4 Вт/м² град, что достигается высоко-напорным душевым охлаждением.

4. Упрочнение на установке с регулируемой системой охлаждения (рис. 4) позволяет по сравнению с остальными рассмотренными схемами упрочнения увеличить значения коэффициента теплоотдачи, что повышает эффективность ТПУ.

Библиографический список

1. А.С. №730832. БИ №16, / Кравченко Б. А., Горелов В. В., Трофимов Н. Г., [и др.] 1980. Бюл. №16.

2. Пат. 2170272 РФ, (51) МПК 7 21D9/00, C21D1/62, C21D1/10. Установка для термопластического упрочнения лопаток

[Текст] / Б.А. Кравченко, Н.И. Россеев, В.Г. Круцило [и др.] № 2000116938/02; опубл. 10.07.2001, Бюл. №19.

3. Пат. 2258086 РФ, (51) МПК 7 C21D9/00, C21D1/62. Способ термопластического упрочнения деталей и установка для его осуществления [Текст] / В.Г. Круцило № 2003136715/02; опубл. 10.08.2005. Бюл. №25.

4. Пат. 101447 РФ, (51) МПК C21D 9/00 (2006.01). Установка для термопластического упрочнения деталей [Текст] / А.В. Карпов, С. А. Папчихин № 2010126356; опубл.: 20.01.2011 Бюл. № 2.

5. Пат. 2143011 РФ, (51) МПК⁶ C22F1/10. Способ повышения циклической прочности деталей газотурбинных двигателей из жаропрочных сплавов на основе никеля / Кравченко Б.А. - № 96113810/02; опубл.: 20.12.1999. Бюл. №14.

COMPARATIVE ANALYSIS OF FACILITIES FOR THE IMPLEMENTATION OF THERMOPLASTIC HARDENING BLADES OF GAS TURBINE ENGINES AND PUMPING UNITS

©2011 A. V. Karpov

Samara State Technical University

In the article the basic design of patented plants to implement the process of hardening the thermoplastic (TPU) blades of gas turbine engines and gas compressor units.

Thermoplastic hardening, plants for thermoplastic hardening, hardening of the regime; blades of gas turbine engines and gas compressor units.

Информация об авторах

Карпов Александр Вячеславович, старший преподаватель кафедры «Инструментальные системы и сервис автомобилей» Самарского государственного технического университета. Тел.: 8-927-721-30-13. E – mail: isap@samgtu.ru. Область научных интересов: технология машиностроения (упрочнение деталей машин).

Karpov Alexander Vyacheslavovich, a senior lecturer in "Instrumentation systems and service vehicles" of Samara State Technical University. Phone: (846) 333-34-53. E-mail: isap@samgtu.ru. Area of research: hardening of machine parts and equipment.