
**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 621.7(072)

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ
ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ АТОМНОГО
МАШИНОСТРОЕНИЯ**

© 2019 В.Т. Саункин*, В.В. Кривин*, Н.Г. Григорьев**, О.Е. Драка*

**Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского
ядерного университета МИФИ, Волгодонск, Ростовская обл., Россия*

***Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск, Ростовская обл., Россия*

В работе рассматривается проблема повышения точности обработки изделий атомного машиностроения. Проведенные расчеты показали, что основной (весомой) составляющей погрешности обработки является динамическая погрешность, то есть в условия работы системы. Экспериментальные исследования подтвердили этот вывод и показали, что основным фактором является температурная деформация изделия в процессе обработки. Влияние указанного фактора можно минимизировать, изменяя параметры режимов обработки. Для этого можно использовать полученные экспериментальные зависимости.

Ключевые слова: изделия атомного энергетического машиностроения, размерная точность изделия, температурная деформация изделия, в процессе его обработки, технологический режим обработки изделия.

Поступила в редакцию 21.02.2019

После доработки 15.03.2019

Принята к публикации 22.03.2019

В атомном машиностроении предъявляются высокие требования к качеству изготовления деталей. Это связано, как правило, с последующей качественной сборкой изделия, что, в конечном счете, определяет его качественную работу в жестких условиях эксплуатации. Особые требования предъявляются к качеству изготовления парных деталей (например, вал – втулка), которые обрабатываются с требуемым зазором (натягом). Это важно, как правило, они работают в условиях повышенных температур и к деталям предъявляются жесткие требования по допускам на зазор или натяг.

Однако при обработке точных деталей возникает много трудностей. Одна из них износ режущей кромки инструмента в процессе обработки деталей (особенно крупногабаритных) [1].

Используемое для обработки оборудование относится к электромеханическим, в которых большое значение имеет инерционность движущихся и вращательных частей. Инерционность и упругие деформации системы могут быть причинами нарушения устойчивости работы системы и негативно сказываться на точности обработки.

В атомном машиностроительном производстве детали машин изготавливают с высокой размерной точностью. Высокая точность геометрических размеров и формы деталей обеспечивают правильное функционирование, надежность и долговечность работы механизмов и машин. Точность размеров деталей определяет возможность их правильной сборки и взаимозаменяемости, позволяющей существенно снизить затраты

при изготовлении, ремонте и эксплуатации механизмов и машин.

Для обеспечения высокой точности на финишных операциях станки снабжают средствами контроля размеров обрабатываемых деталей. К таким видам обработки относится, например, внутреннее шлифование, круглое наружное врезное шлифование, плоское шлифование с многократным проходом шлифовального круга по обрабатываемой поверхности, врезное точение и т.п. [2].

Погрешности обработки зависят как от собственных погрешностей измерительного устройства, так и от погрешностей станка (наличия зазоров, инерционности узлов, вибраций при работе), приспособления, износа инструмента, выбранных режимов обработки и других технологических особенностей [3].

Баланс точности системы должен производиться на основе составляющих этой суммарной погрешности. Отдельно должны быть определены собственные погрешности средства контроля статических и динамических условиях, а также составляющие суммарной погрешности, вносимыми различными технологическими факторами.

Необходимо иметь в виду, что погрешности геометрической формы деталей, вызванные несовершенством отдельных узлов станка, не компенсируются средствами контроля [4]. Поэтому применение даже самых точных средств контроля не гарантирует получение высокой размерной точности деталей, если какой-либо из элементов технологической системы не отвечает определенным требованиям [5].

Суммарная погрешность обработки включает систематическую и случайную составляющие. Случайная составляющая при автоматизированном производстве с использованием средств контроля, составляет большую часть суммарной погрешности.

Поэтому будем рассматривать лишь случайную составляющую суммарной погрешности обработки, которая характеризуется средней квадратической случайной погрешностью.

Рассмотрим методику расчета погрешностей при окончательных операциях на примере круглого шлифования, поскольку именно на этих операциях окончательно формируется размер и качество обработанной поверхности.

При врезном шлифовании средняя квадратическая погрешность обработки, определяющая поле рассеяния размеров деталей, представляет собой результат суммирования следующих составляющих:

$$\Delta_{\text{сум}} = \sqrt{\Delta_{\text{ПС}}^2 + \Delta_{\text{ПД}}^2 + \Delta_{\text{СС}}^2 + \Delta_{\text{СД}}^2}, \quad (1)$$

где $\Delta_{\text{ПС}}$ – средняя квадратическая погрешность средства контроля в статических условиях; $\Delta_{\text{ПД}}$ – средняя квадратическая погрешность средства контроля в динамических условиях работы; $\Delta_{\text{СС}}$ – средняя квадратическая погрешность обработки в статических условиях; $\Delta_{\text{СД}}$ – средняя квадратическая погрешность обработки в динамических условиях работы.

Погрешность $\Delta_{\text{СС}}$ регламентируется паспортными данными средства контроля. Погрешность $\Delta_{\text{СД}}$ зависит от скорости V изменения размера в момент формирования окончательной команды. Погрешность $\Delta_{\text{СС}}$ зависит от времени срабатывания механизма отвода шлифовальной бабки и скорости V изменения размера в момент прекращения обработки. Погрешность $\Delta_{\text{СД}}$ зависит от температурных деформаций и некруглости обрабатываемых деталей в момент прекращения обработки.

Погрешность средств контроля в динамических условиях работы можно определить как:

$$\Delta_{\Pi\Delta} = \sqrt{(\bar{t}_{\Pi}\Delta_V)^2 + (\bar{V}\Delta_{\Pi\Gamma})^2}, \quad (2)$$

где $\bar{t}_{\Pi}$ – среднее время срабатывания средств контроля (регламентируется паспортными данными); Δ_V – средняя квадратическая погрешность, характеризующая непостоянство скорости изменения размера при прекращении обработки (определяется экспериментально); $\bar{V}$ – средняя скорость изменения размера (определяется экспериментально); $\Delta_{\Pi\Gamma}$ – средняя квадратическая погрешность, характеризующая непостоянство времени срабатывания средства контроля (регламентируется паспортными данными).

Погрешность обработки в статических условиях определяется выражением:

$$\Delta_{CC} = \sqrt{(\bar{t}_C\Delta_V)^2 + (\bar{V}\Delta_{\Gamma C})^2}, \quad (3)$$

где $\bar{t}_C$ – среднее время срабатывания станка (для большинства станков $\bar{t}_C = 0,15 \dots 0,25$ с); $\Delta_{\Gamma C}$ – средняя квадратическая погрешность, характеризующая непостоянство времени срабатывания станка (для большинства станков $\Delta_{\Gamma C} = 0,015 \dots 0,025$ с).

Погрешность обработки в динамических условиях работы:

$$\Delta_{CD} = \sqrt{\Delta_T^2 + \Delta_{\Phi}^2}, \quad (4)$$

где Δ_T – средняя квадратическая погрешность, зависящая от температурной деформации детали; Δ_{Φ} – средняя квадратическая погрешность, возникающая вследствие погрешности формы детали.

Погрешность, зависящую от температурных деформаций, можно определить как:

$$\Delta_T = \sqrt{\Delta_{VT}^2 + \Delta_{\delta T}^2}, \quad (5)$$

где Δ_{VT} – средняя квадратическая погрешность, обусловленная температурной деформации детали и зависящая от величины подачи (определяется экспериментально); $\Delta_{\delta T}$ – средняя квадратическая погрешность, обусловленная температурной деформации детали, зависящая от величины припуска, режущей способности круга (определяется экспериментально).

Представляет интерес изменение температурной деформации деталей в процессе врезного шлифования [10].

На рисунке 1 приведен экспериментальный график, характеризующий зависимость температурной деформации кольца Δ_{t0} диаметром 55 мм при шлифовании внутреннего отверстия диаметром 40 мм от времени обработки. Условия обработки: скорость резания $V_{рез} = 60$ м/с, цикл шлифования – врезание с подачей $S = 10,0$ мкм/с, частота вращения $n = 530$ мин⁻¹, припуск $a = 0,6$ мм, время шлифования 7 с (врезания – 2,8 с, время установившегося съема – 3 с, время выхаживания – 1,2 с).

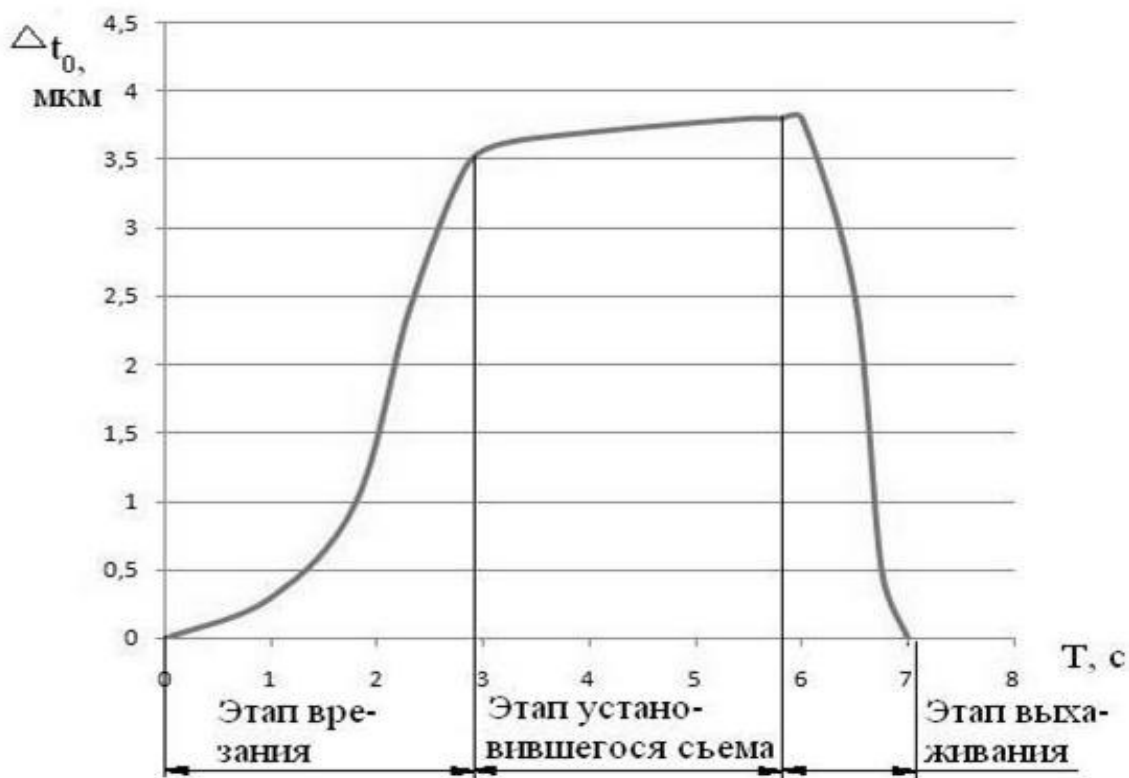


Рисунок 1 – Зависимость температурной деформации (Δt_0) от времени цикла шлифования [Dependence of temperature deformation (Δt_0) on the grinding cycle time]

Как видно из рисунка 1, на этапе врезания с некоторым запаздыванием температурные деформации увеличиваются. На этапе установившегося съема температурные деформации из-за инерционности тепловых процессов некоторое время продолжают расти и затем стабилизируются. На этапе выхаживания температурные деформации с некоторым запаздыванием уменьшаются.

Как показали исследования, на точность обработки большое влияние оказывают погрешности, обусловленные технологической системой «станок-приспособление-инструмент-деталь», а также технологические факторы [9].

Исследования показали влияние на нестабильность съема припуска: суммарная погрешность обработки возрастает с увеличением нестабильности скорости съема припуска [6]. Отмечено, что в процессе работы шлифовального станка происходит постепенный нагрев смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), приводящий к возникновению тепловых деформаций элементов станка и обрабатываемых деталей. Большой разброс величины припуска на обработку также является причиной возникновения погрешности обработки [7]. Разница в величине снимаемого припуска приводит к различному теплообразованию и соответственно к различным тепловым деформациям обрабатываемой детали.

На рисунке 2 показаны результаты измерения валов, обработанных методом врезания при различных подачах. Станок оснащен прибором контроля с настольной измерительной скобой, выдающим предварительную команду на прекращение подачи и включение выхаживания, и окончательную команду на отвод шлифовального круга. Припуск на обработку составляет 0,3 мм. Перед шлифованием каждой новой детали устанавливали новую подачу, величину которой измеряли в процессе шлифования.

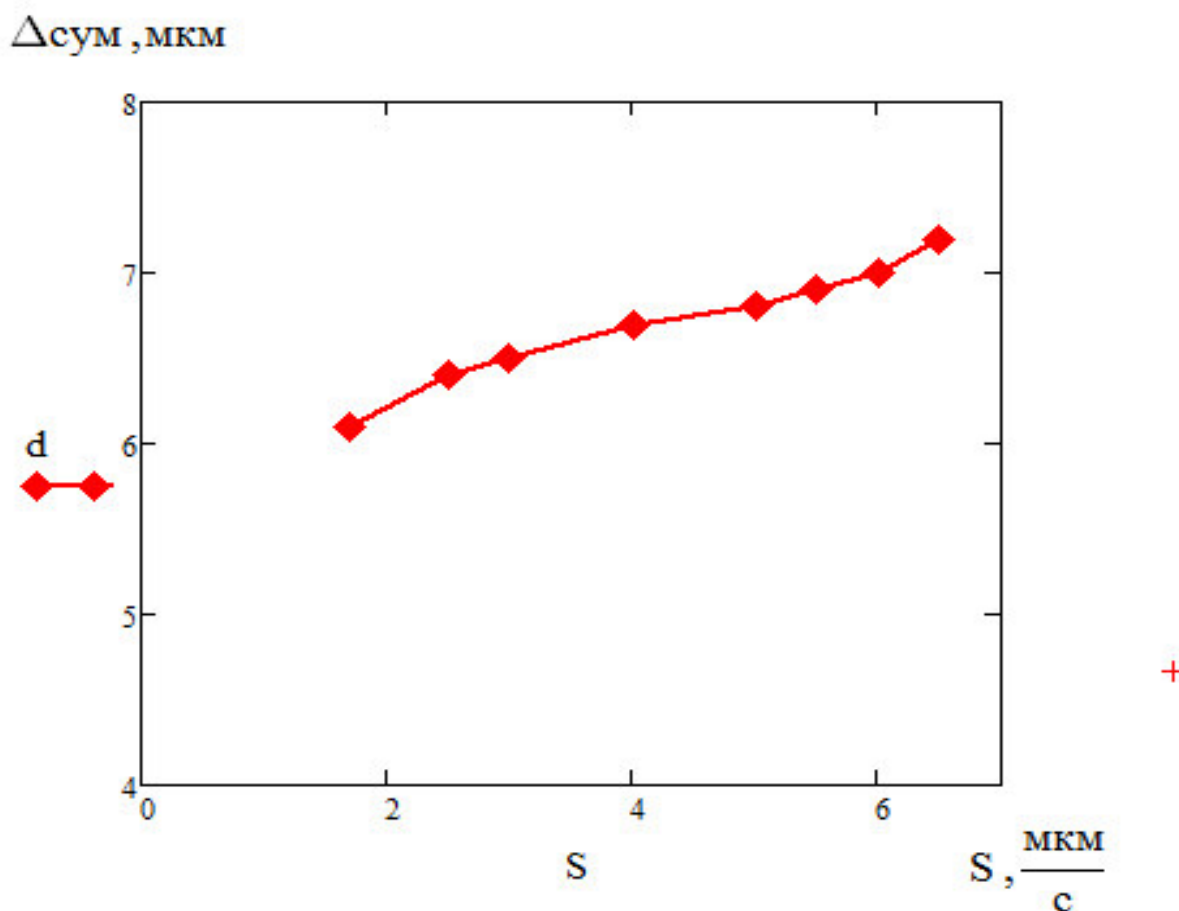


Рисунок 2 – Влияние подачи на погрешность обработки [Effect of transport to machining error]

Из графика видно, что с увеличением подач погрешность обработки увеличивается. Влияние величины подачи на размер вала может быть объяснено тем, что большей величине подачи соответствуют большие величины силовых и тепловых деформаций в конце обработки. В зависимости от величины подачи снимается больший или меньший слой металла в единицу времени, что приводит к различным теплообразованиям, вследствие чего к моменту выдачи окончательной команды детали в партии имеют разную температуру. После температурной стабилизации детали, шлифованные в более форсированном режиме, имеют меньший размер, чем детали, шлифованные в более мягких режимах.

Первоначально устройство контроля настраивают по специальной аттестованной детали. Температурную деформацию контролировали на необрабатываемой наружной поверхности одновременно с обработкой внутренней поверхности. В процессе шлифования кольцо нагревается и меняется его наружный диаметр.

Представляет интерес этап врезания, так как в это время в основном формируются температурные деформации. На рисунке 3 приведен экспериментальный график, характеризующий влияние подачи S на скорость съема припуска v , на температурные деформации Δ_{10} кольца при шлифовании внутреннего отверстия диаметром 40 мм на этапе врезания. Условия обработки: скорости съема припуска $v = 1,0; 5,0; 10,0; 15,0; 20,0; 25,0$ мкм/с.

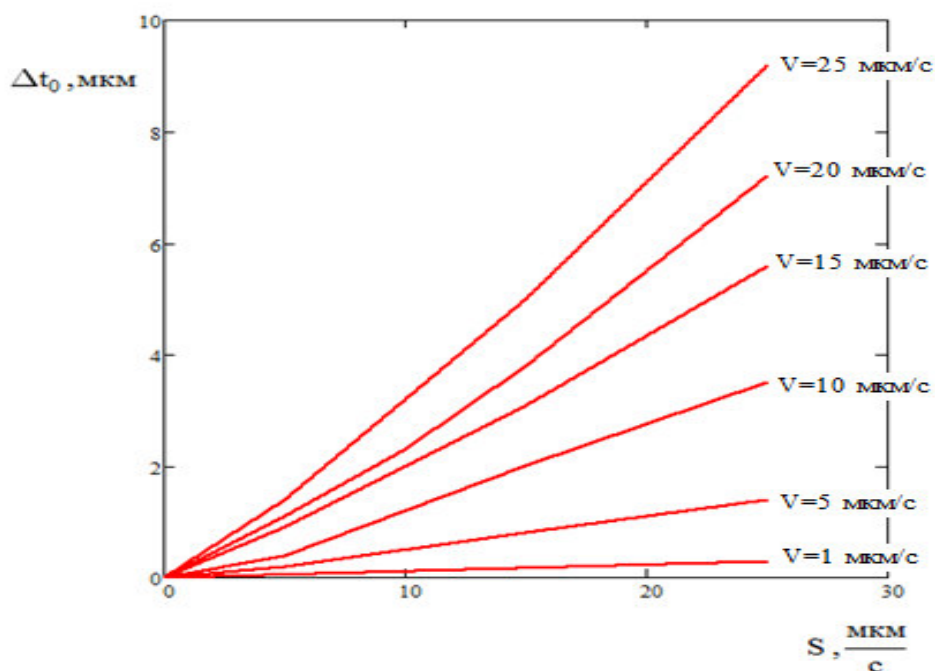


Рисунок 3 – Влияние скорости съема припуска (V) и подачи (S) на этапе врезания на температурную деформацию детали [Influence of the stock removal rate (V) and transport (S) during the plunge stage on the temperature deformation of the part]

Как видно из графика на этапе врезания с увеличением скорости съема припуска и подачи температурные деформации возрастают. Это обстоятельство необходимо учитывать при выборе режима обработки деталей.

В условиях производства на финишную шлифовальную операцию детали поступают непосредственно с предварительных токарной и шлифовальной операций. Обработка на этих операциях ведется с интенсивными режимами и соответственно с большим теплообразованием [10]. Детали не успевают пройти процесс температурной стабилизации. Возникшие температурные деформации увеличивают погрешность обработки при окончательном шлифовании. Особенно это сказывается при обработке крупногабаритных деталей [2]. Поэтому целесообразно стабилизировать температуру заготовок для обеспечения высокой точности обрабатываемых деталей.

Как видно из графиков температурная деформация деталей возрастает с повышением скорости съема припуска и подачи, а так же увеличением неустойчивости скорости съема припуска.

По графикам можно выбрать оптимальные значения параметров процесса обработки с целью стабилизации размерной точности детали в динамическом режиме их обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саункин, В.Т. Повышение производительности и точности автоматического контроля деталей [Текст] / В.Т. Саункин, С.Г. Онищук, С.Л. Миранцов // Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. – 2008. – № 1 (11). – С. 162-165.
2. Ковалевский, С.В. Типовые технологические процессы в тяжелом машиностроении [Текст] / С.В. Ковалевский, С.Г. Онищук, В.Т. Саункин – Донбасская государственная машиностроительная академия, 2009. – 124 с.

3. Саункин, В.Т. Исследование погрешности обработки при использовании средств активного контроля [Текст] / В.Т. Саункин, С.Л. Миранцов // Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. – 2009. – №2. – С. 150-153.
4. Саункин, В.Т. Исследование погрешности обработки деталей при использовании средств активного контроля [Текст] / В.Т. Саункин, С.Г. Онищук // Вестник Тернопольского государственного национального технического университета. – 2010. – Т.15. – Вып. 4. – С. 85-89.
5. Саункин, В.Т. Ошибки обработки деталей при использовании средств активного контроля [Текст] / В.Т. Саункин, С.Г. Онищук // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сборник научных трудов. Донбасская государственная машиностроительная академия. – 2010. – Вып. 27. – С. 136-140.
6. Ковалевский, С.В. Типовые технологические процессы в тяжелом машиностроении [Текст] / С.В. Ковалевский, В.Т. Саункин, О.Н. Волошин – Донбасская государственная машиностроительная академия, 2010. – 116 с.
7. Саункин, В.Т. Исследование погрешности обработки деталей при использовании средств активного контроля [Текст] / В.Т. Саункин, С.Г. Онищук // Вестник приазовского национального технического университета. – 2011. – Вып. 22. – С. 189-192.
8. Ковалевский, С.В. Технологии в области тяжелого машиностроения – процессов и управления [Текст] / С.В. Ковалевский, С.Г. Онищук, В.Т. Саункин // Vrnjaska, Banja: SATCIP, 2011. – 350 с.
9. Саункин, В.Т. Разработка методических рекомендаций оценки переходного процесса при механообработке крупногабаритных изделий [Текст] / В.Т. Саункин, Н.П. Григорьев, О.Е. Драка // Глобальная ядерная безопасность. – 2017. – № 1 (22) – С. 54-58.
10. Советов, Б.Я. Моделирование систем [текст]: учебник для вузов. / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – Москва : Высш. шк., 2005. – 343 с.

REFERENCES

- [1] Saunkin V.T., Onishhuk S.G., Miranczov S.L. Povyshenie proizvoditel'nosti i tochnosti avtomaticheskogo kontrolya detalej [Improving Performance and Accuracy of Automatic Parts Control]. Bulletin of the Donbass State Machine-Building Academy. 2008. № 1 (11). P. 162-165 (in Russian).
- [2] Kovalevskij S.V., Onishhuk S.G., Saunkin V.T. Tipovy'e texnologicheskie processy v tyazhelom mashinostroenii [Typical Technological Processes in Heavy Engineering]. Donbass State Machine-Building Academy. 2009. 124 p. (in Russian).
- [3] Saunkin V.T., Miranczov S.L. Issledovanie pogreshnosti obrabotki pri ispol'zovanii sredstv aktivnogo kontrolya [Investigation of Processing Error when Using Active]. Scientific Herald of the Donbass State Machine-Building Academy. 2009. №2. P. 150-153 (in Russian).
- [4] Saunkin V.T., Onishhuk S.G. Issledovanie pogreshnosti obrabotki detalej pri ispol'zovanii sredstv aktivnogo kontrolya [The Study of Accuracy of Machining Parts Using Active]. Bulletin of Ternopil State National Technical University. 2010. T.15. Issue. 4. P. 85-89 (in Russian).
- [5] Saunkin V.T., Onishhuk S.G. Oshibki obrabotki detalej pri ispol'zovanii sredstv aktivnogo kontrolya [Parts Processing Errors when Using Means of Active Control. Reliability of Tool and Optimization of Technological Systems: a Collection of Scientific Papers]. Donbass State Engineering Academy. 2010. Vol. 27. P. 136-140 (in Russian).
- [6] Kovalevskij S.V., Saunkin V.T., Voloshin O.N. Tipovy'e texnologicheskie processy v tyazhelom mashinostroenii [Typical Technological Processes in Heavy Engineering]. Donbass State Machine-Building Academy. 2010. 116 p. (in Russian).
- [7] Saunkin V.T., Onishhuk S.G. Issledovanie pogreshnosti obrabotki detalej pri ispol'zovanii sredstv aktivnogo kontrolya [The study of Accuracy of Machining Parts Using Active Control]. Bulletin of the Azov National Technical University. 2011. Vol. 22. P. 189-192 (in Russian).
- [8] Kovalevskij S.V., Onishhuk S.G., Saunkin V.T. Texnologii v oblasti tyazhelogo mashinostroeniya – processov i upravleniya [Technologies in the Field of Heavy Engineering - Processes and Management]. Vrnjacka, Banja: SATCIP, 2011. 350 p. (in Russian).
- [9] Saunkin V.T., Grigor'ev N.P., Draka O.E. Razrabotka metodicheskix rekomendacij ocenki perexodnogo processa pri mexanoobrabotke krupnogabaritny'x izdelij [Development of Guidelines for Assessing the Transition Process during the Machining of Large-Sized Products]. Global'naya yadernaya bezopasnost'. [Global Nuclear Safety]. 2017. № 1 (22). P. 54-58 (in Russian).
- [10] Sovietov, B.Ya., Yakovlev S.A. Modelirovanie sistem [System Modeling]. Moscow. Higher school. 2005. 343 p. (in Russian).

Development of Methodical Recommendations to Improve Treatment Accuracy of Nuclear Engineering Products

V.T. Saunkin^{1*}, V.V. Krivin, N.G.^{2*}. Grigoriev^{3**}, O.E. Draka^{4*}

**Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,
Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

***«Atommash» the branch of «AEM-Technologies» JSC, Volgodonsk, Rostov region, Russia*

¹ORCID ID: 000-0002-3462-4853

Wos Researcher ID: F-3352-2017

e-mail: saunkin@mail.ru

²ORCID ID: 0000-0003-0903-0786

Wos Researcher ID: E-2267-2018

e-mail: krivin1949@mail.ru

³ORCID ID: 000-0002-5654-5021

Wos Researcher ID: F-3370-2017

e-mail: grigoryev@mail.ru

⁴ORCID ID: 000-0002-3397-6830

Wos Researcher ID: F-3316-2017

e-mail: oed17@mail.ru

Abstract – The paper deals with the problem of increasing the accuracy of the processing of nuclear engineering products. The calculations show that the main (significant) component of the processing error is the dynamic error, that is, in the conditions of the system. Experimental studies is confirmed this conclusion and shows that the main factor is the temperature deformation of the product during processing. The influence of this factor can be minimized by changing the parameters of the processing modes so the experimental dependencies can be used.

Keywords: nuclear power engineering products, product dimensional accuracy, product temperature deformation, processing, technological mode of product processing.