

Исследование влияния жёсткости технологической системы на производительность высокоскоростной операции на станках с ЧПУ

А.Х. Нуркенов,
доц., к.т.н., nurkenovak@susu.ru
ЮУрГУ (НИУ), г. Челябинск

В данной работе автором проведено исследование влияния жесткости технологической системы на производительность высокоскоростной операции, и сформированы рекомендации по проектированию высокоскоростных операций на станках с ЧПУ, а также определены направления автоматизации данных расчетов на основе применения САМ-систем.

In this paper author investigated the effect of the rigidity of the technological system on the performance of high-speed operation, and formed recommendations on the design of high-speed operations on CNC machines, and also determined the directions of automation of these calculations based on the use of CAM systems.

Проектирование технологических процессов высокоскоростных операций для изготовления новых изделий в машиностроении является сложной комплексной задачей. Требуется выполнения условий к техническому уровню этих изделий, максимально высокие потребительские качества, при приемлемой, для потребителя, стоимости изделия. В целях определения оптимального соотношения производительности труда и себестоимости выпускаемой продукции, возможна разработка нескольких вариантов технологических процессов обработки детали [1-3]. Поиск наиболее эффективного варианта технологического процесса обработки детали на этапе технологической подготовки производства ведётся по следующим направлениям [4-6]:

- анализируются группы необходимого технологического оборудования;
- анализируется необходимая технологическая оснастка;
- анализируется требуемый режущий инструмент.

При этом, комплексное влияние данных параметров при задании режимов обработки является трудоемкой задачей. Следует отметить, что это ограничение по сложности принятия решения можно косвенно компенсировать за счет параметров технологической системы [7-10]. В первую очередь – это жёсткость технологической системы, которая позволяет учитывать, как исходное состояние заготовки, так и исходное состояние оборудования и оснастки [13]. Таким образом, возникает необходимость создания алгоритма или математической модели по выбору оптимального направления при проектировании технологических процессов изготовления изделий машиностроения на основе высокоскоростных технологий с учетом имеющихся ограничений [11-12].

Основными критерием такого выбора могут являться:

- себестоимость технологического процесса изготовления детали, которая непосредственно зависит от производительности процесса обработки;
- гибкость и универсальность технологического процесса, обеспечиваемая при переходе производства на изготовление любой другой детали, которая обусловлена технологическими возможностями оборудования [14-15].

В данной работе автором проведено исследование влияния жесткости технологической системы на производительность высокоскоростной операции, и сформированы рекомендации по проектированию высокоскоростных операций на станках с ЧПУ, а также определены направления автоматизации данных расчетов на основе применения САМ-систем. Основой для реализации модуля является разработанная автором методика проектирования циклов высокоскоростной операции шлифования для станков с ЧПУ, позволяющая рассчитывать режимы обработки с автоматическим формированием количества ступеней цикла. Построение цикла производится в системе координат «радиальная подача/припуск». Для оптимизации значения подач на каждой ступени цикла применяется метод направленного перебора.

После формирования сетки задается определенная очередность проверки ограничений при перемещении по сетке «радиальная подача/припуск». Первым рассчитывается ограничение радиальной подачи шлифовального круга по параметрам станка. Затем, рассчитывается подача, выполняющая требования по шероховатости поверхности детали при заданной частоте вращения заготовки по уравнению. Далее расчетное значение подачи, ограниченное шероховатостью поверхности детали, сравнивается с паспортными данными станка. При выполнении ограничения по шероховатости поверхности детали следующим проверяется ограничение по потребной мощности привода для заданной величины радиальной подачи. При выполнении заданных условий производится расчет предельной силы по осыпаемости шлифовального круга и главной составляющей силы резания для заданной радиальной подачи по уравнению. Затем производится расчет температуры в зоне обработки и глубины прижога на поверхности заготовки при заданной радиальной подаче по уравнениям. Полученное значение глубины прижога проверяется на основе сравнения с остаточной величиной припуска. Далее производится проверка заданной радиальной подачи по величине упругих деформаций в технологической системе. Таким образом, при выполнении заданных выше условий проверки производится перемещение по сетке в координате припуска на заданной подаче и повторный расчет описанных выше ограничений.

Для наглядности влияния состояния технологической системы на формирования ступеней в системе координат «радиальная подача/припуск» представлен пример формирования цикла на рисунках 1-6. На рисунке 1 представлен шаг по сетке с радиальной подачей S_1 и припуском h_1 . В точке 1 произведен расчет ограничений радиальной подачи S_1 по паспортным данным станка, шероховатости поверхности, потребной мощности привода, осыпаемости шлифовального круга. Данная подача прошла этот блок ограничений, поэтому произведен расчет глубина прижога $h_{\text{приж}}$. Из графика видно, что глубина прижога проходит ограничения по остаточному припуску. Поэтому производится расчет фактического изменения радиальной подачи с учетом фактической жёсткости технологической системы (кривая 1) с

заданной подачи S_1 до подачи S_{\min} , в которой выполняются требования по шероховатости поверхности детали. В результате расчета фактическая координата удаляемого припуска 2^* показывает отличие от заданного значения в координате «припуска» (точка 2), но при этом выполняется требование ограничения радиальной подачи по упругим деформациям в технологической системе. Таким образом, заданная подача S_1 выполняет описанные выше ограничения и позволяет сформировать двухступенчатый цикл шлифования, гарантирующий выполнение заданных технологических ограничений при перемещении шлифовального круга в точку Π_0 с удалением всего припуска.

Для проверки возможности улучшения полученного двухступенчатого цикла шлифования производится повторный шаг по оси «припуска» с подачей S_1 (см. рис. 2). В точке 2 также производится расчет ограничения радиальной подачи S_1 глубине прижога. При выполнении ограничения по глубине прижога производится расчет фактического изменения радиальной подачи с учетом фактической жесткости технологической системы (кривая 1) с заданной подачи S_1 до подачи S_{\min} , в которой выполняются требования по шероховатости поверхности детали. В результате расчета фактическая координата удаляемого припуска 3^* показывает отличие от заданного значения в координате «припуска» (точка 3), но требование ограничения радиальной подачи по упругим деформациям в технологической системе выполняется (кривая 1). Таким образом, заданная подача S_1 в данной координате по оси «припуска» также позволяет сформировать двухступенчатый цикл шлифования, выполняющий все ограничения при переходе в точку Π_0 .

Аналогично для оценки возможности улучшения цикла шлифования производится перемещение по координате оси «припуска» с подачей S_1 в точку 3 (см. рис. 3). Однако, заданная подача проходит только первые четыре ограничения. При расчете ограничения по прижогу из рисунка видно, что величина остаточного припуска меньше глубины прижога и при расчете снижения подачи S_1 до подачи S_{\min} не выполняется ограничение радиальной подачи по упругим деформациям в ТС, то есть снижение фактической подачи происходит в точке 4^* , которая находится за пределами остаточного припуска в точке Π_0 (кривая 1). Таким образом, данный вариант не принимается и производится возврат по координате припуска в точку 2 и снижение подачи S_1 до подачи S_2 (см. рис. 4). При новом значении подачи S_2 производится перемещение по координате припуска из точки 3 в точку 4 с последующим расчетом ограничения по глубине прижога и упругим деформациям в технологической системе. В данном случае подача S_2 проходит силовое ограничение и глубине прижога. После моделируется снижение подачи S_2 до подачи S_{\min} (кривая 1). Снижение радиальной подачи производится в точке 5^* , что показывает выполнение ограничения по упругим деформациям в ТС. В результате получаем трехступенчатый цикл с удалением остаточного припуска в точке Π_0 .

Для проверки возможности улучшения трехступенчатого цикла шлифования производится перемещение по координате «припуска» на подаче S_2 в точку 5 (см. рис. 5). Из рисунка видно, что подача S_2 не проходит ограничение по глубине прижога в точке 6 и по величине упругих деформаций в ТС при снижении подачи в точке 6^* , так как присутствует выход за координату в точке Π_0 (кривая 1). Поэтому данный ход по сетке отбрасывается и производится возврат в точку 4 с последующим снижением подачи S_2 до подачи S_3 в точке 5 (см. рис. 6.). Данная подача проходит силовые и ограничения по глубине прижога при перемещении в точку 6. Далее производится моделирование снижения подачи S_3 до подачи S_{\min} в точке 7. Из рисунка видно, что подача S_3 проходит ограничение по упругим деформациям в ТС и формируется четырех ступенчатый цикл шлифования с удалением остаточного припуска в точке Π_0 .

Таким образом, по разработанной методике проектирования формируется первый вариант допустимого цикла шлифования, который записывается в массив циклов при заданной частоте. Затем начальная подача в сетке S_1 уменьшается на заданный шаг h_s и производится повторный расчет ограничений для оценки допустимости данного хода.

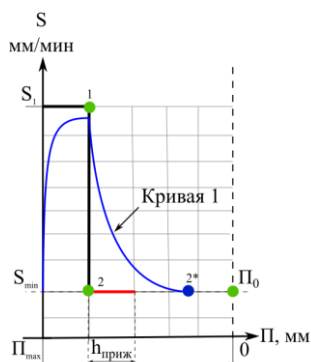


рис. 1 Пример формирования ступеней цикла в координатах 1-2

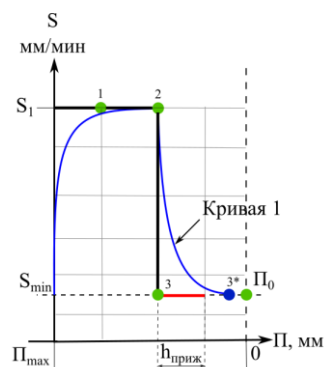


рис. 2 Пример формирования ступеней цикла в координатах 1-3

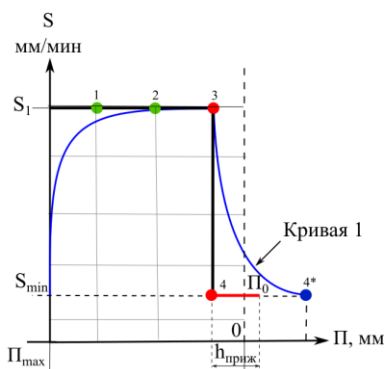


рис. 3 Пример формирования ступеней цикла в координатах 1-4

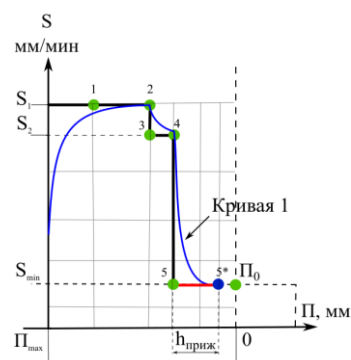


рис. 4 Пример формирования ступеней цикла в координатах 1-5

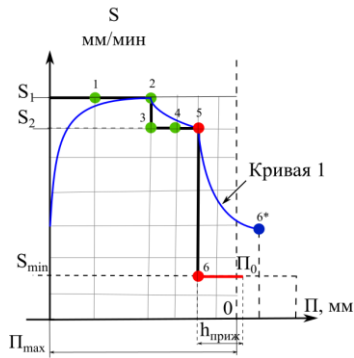


рис. 5 Пример формирования ступеней цикла в координатах 1-6

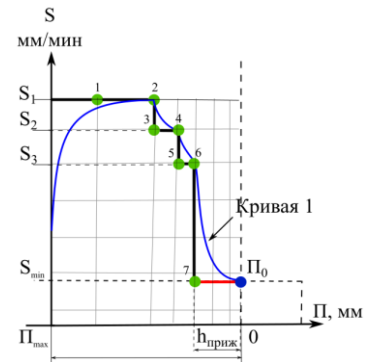


рис. 6 Пример формирования ступеней цикла в координатах 1-7

После расчёта ограничений также, как и в первом варианте цикла производится расчёт остальных ступеней цикл шлифования. В результате n-ого количества уменьшений начальной подачи цикла и повторных расчетов формируется второй допустимый цикл шлифования, который записывается в массив циклов при заданной частоте вращения заготовки. Таким образом уменьшение начальной подачи в следующем варианте цикла производится до тех пор начальная радиальная подача S_1 не будет равна S_{min} , то есть будет сформирован одноступенчатый цикл шлифования, при котором перемещение по оси «припуска» будет производиться на максимальной подаче, ограниченной шероховатостью поверхности. В результате массив циклов будет содержать n-ое множество допустимых циклов шлифования с различным количеством ступеней цикла. Из данного массива циклов выбирается вариант с наименьшим временем обработки. Если требования по допуску выполняются, то данный цикл записывается оптимальным при заданной частоте вращения детали. Если требования не выполняются – данный цикл удаляется из массива циклов и производится проверочный расчёт следующего по производительности цикла. Данная последовательность повторяется до тех пор, пока проверяемый цикл не будет удовлетворять требованиям по заданной точности детали. Наиболее производительный цикл шлифования, выполняющий технологические ограничения, записывается как оптимальный при заданной частоте вращения заготовки.

Для оценки влияния параметра жесткости произведены расчеты в программном модуле, реализующем описанную выше методику оптимизации режимов высокоскоростной обработки шлифованием с параметрами, представленными на рисунках 7-10. В разработанном модуле расчета цикла высокоскоростной обработки указываются следующие группы параметров: параметры оборудования, параметры инструмента, параметры заготовки, коэффициенты для учета температуры в зоне обработки и износа шлифовального круга.

Параметры оборудования	Параметры инструмента	Параметры заготовки	Коэф.
Максимально допустимая подача по паспорту станка, мм/мин.....			1,2
Минимально допустимая подача по паспорту станка, мм/мин.....			0,001
Минимальная частота вращения заготовки, об/мин.....			140
Максимальная частота вращения заготовки, об/мин.....			150
Мощность привода шлифовальной бабки, кВт.....			3,7
Шаг изменения подачи внутри цикла при переборе, мм/мин.....			0,001
Шаг изменения максимальной подачи цикла при переборе, мм/мин.....			0,001
Шаг изменения частоты вращения, об/мин.....			10
Минимальная жесткость в партии заготовок, Н/м.....			3600000
Максимальная жесткость в партии заготовок, Н/м.....			3600000

рис. 7 Выбор параметров оборудования в модуле расчёта цикла высокоскоростной обработки

Параметры инструмента	Параметры заготовки	Коэффициенты
Скорость вращения шлифовального круга, м/с.....		50
Диаметр шлифовального круга, мм.....		600
Средний размер абразивного зерна, мм.....		0,45
Условный номер твердости шлифовального круга.....		7
Номер структуры шлифовального круга.....		7
Коэффициент затупления шлифовального круга, %.....		0,01
Уровень скалывания зерен при правке круга, мм.....		0,1

рис. 8 Выбор параметров инструмента в модуле расчёта цикла высокоскоростной обработки

Параметры инструмента	Параметры заготовки	Коэффициенты
Припуск на обработку, заданный технологом, мм.....		0,15
Ширина шлифования (высота круга или менее), мм.....		10
Исходный диаметр заготовки, мм.....		40
Требуемая шероховатость поверхности, мкм.....		1,25
Предел прочности материала заготовки, МПа.....		530
Предельная прочность материала Сигмаи, МПа.....		214

рис. 9 Выбор параметров заготовки в модуле расчёта цикла высокоскоростной обработки

Параметры инструмента	Параметры заготовки	Коэффициенты
Коэффициент, учитывающий снижение температуры при применении СОЖ.....		1
Коэффициент, учитывающий отвод тепла в инструмент.....		1
Размерный коэффициент M.....		3,1
Эмпирический коэффициент А при расчете температуры.....		36,9
Эмпирический коэффициент X при расчете температуры.....		-0,75

рис. 10 Выбор коэффициентов в модуле расчёта цикла высокоскоростной обработки

Для оценки влияния жесткости технологической системы на производительность высокоскоростной операции произведены расчеты в модуле проектирования высокоскоростных операций на станках с ЧПУ для интервалов жесткости от $1,6 \cdot 10^6$ до $6 \cdot 10^6$ Н/м. Полученные результаты представлены на рисунке 11. Из рисунка видно, что увеличение жесткости технологической системы напрямую коррелирует с уменьшением времени обработки (см. рис. 11а). Однако, производительность обработки, в случае если принять номинальным значением максимальное расчетное время цикла 55,6 с как 100%, показывает регрессию по отношению к предыдущей редукации с 134 до 109% (см. рис 11б).

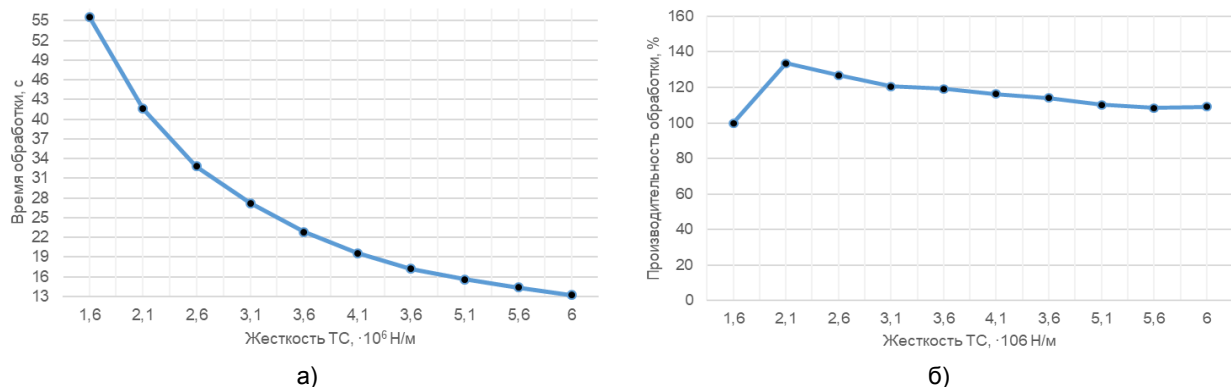


рис. 11 График зависимости времени обработки от жесткости технологической системы: а) зависимость «жесткость – время»; б) зависимость «жесткость – производительность»

Если учитывать жесткость ТС как комплексный параметр станок-заготовка-инструмент, то определение влияния каждого элемента системы на производительность обработки позволит дискретно ранжировать важность данных элементов системы. Поэтому для оценки влияния параметра обрабатываемости заготовки при постоянных условиях обработки (см. рис. 7-10) также сформированы расчётные циклы шлифования (см. табл. 1, рис. 12).

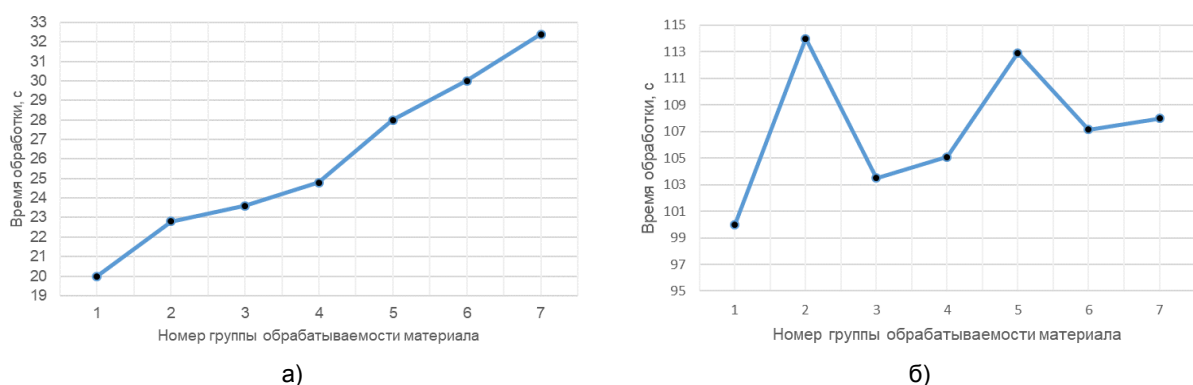


рис. 12 График зависимости времени обработки от группы обрабатываемости материала: а) зависимость «группа обрабатываемости материала – время»; б) зависимость «группа обрабатываемости материала – производительность»

Таблица 1

Группы обрабатываемости материала

Номер группы обрабатываемости материалов	Интенсивность напряжений, σ_i , 10^7 , Н/м ²	Марки материалов (представители группы)
1	214	18ХНВА, ХВГ, 30ХГСНА, 30ХГТ, У10, 35ХМ, 40ХС, 65Г, 5ХНС
2	189	20, 12ХН3А, 20ХН3А, ШХ 15, 18Х2Н4ВА, 38Х2ЮА, ВЧ50-1
3	222	12Х13, 20Х13, 12Х4, 12Х18, Х17Н2, 12Х18Г10Т, ХН35ВТ
4	254	ХН77ТЮ, Х20Н80Т3, ХН56ВМТЮ, ВТЛ, ВТ1-2, ВТ5, ВТ16
5	292	Р18, Р12, Р6М3, Р6М5
6	274	Р9, Р18Ф2, Р14Ф4, Р9Ф4, Р9К5, Р18К5Ф2, Р9М4К8, Р6М5К5
7	231	СЧ12-28, СЧ18-36, СЧ38-60, КЧ30-6, КЧ37-12, КЧ56-4, АСЧ-1, АСЧ-3, АКЧ-1, АКЧ-2, БР.ОЦ10-2, БР.ОС5-25

Из рисунка видно, что увеличение интенсивности напряжений в соответствии с группой обрабатываемости материала напрямую коррелирует с уменьшением времени обработки (см. рис. 12а). При этом, производительность обработки, в случае если принять номинальным значением максимальное расчетное время цикла 32,4 с как 100%, показывает колебание производительности цикла обработки по отношению к предыдущей редуции с 114 до 104% (см. рис 12б). Что показывает тренд повышения производительности обработки при увеличении интенсивности напряжений в соответствии с группой обрабатываемости материалов.

Таким образом, можно сделать вывод о корреляции жесткости технологической, группы обрабатываемости и производительности процесса обработки. Применение инструментов оптимизации и автоматизации расчетов позволяет перейти к цифровизации высокоскоростной обработки с возможностью ее привязки к цифровому двойнику изделия. Исходя из этого становится возможным, с применением разработанной методики и ее реализацией в модуле расчета цикла обработки, сформировать рекомендации по проектированию высокоскоростных операций. Что показывает актуальность предложенных выше решений, как на стадии технологической подготовки производства, так и на стадии оптимизации параметров цифрового двойника изделия/технологии.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации МД-932.2017.8.

Литература

1. Malkin S., Guo C. Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives, 2nd Edn.. Industrial New York – 2008.
2. Xun Chen, Advances in Quality and Productivity in Precision Grinding: A Review of Selected Research, ASME 2016 11th International Manufacturing Science and Engineering Conference, V. 1: Processing Blacksburg, Virginia, USA, 2016.
3. Li B., Luo B., Mao X., Peng, F., Liu, H. A new approach to identifying the dynamic behavior of CNC machine tools with respect to different worktable feed speeds // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2013. P. 73-84.
4. Chen D., Tian Y. Modeling and simulation methodology of the machined surface in ultra-precision grinding // Jixie Gongcheng Xuebao/Journal of Mechanical Engineering. V. 46(13). – 2010. P. 186-191.
5. Kumar N., Tripathi H. Gandotra S. Optimization of Cylindrical Grinding Process Parameters on C40E Steel Using Taguchi Technique // Int. Journal of Engineering Research and Applications www.ijera.com ISSN: 2248-9622, Vol. 5, Issue 1 (Part 3). – 2015. P.100-104.
6. Li H.L., Cao H.Y., Jiang C. Experiment on surface roughness and acoustic emission signal in infeed period of cylindrical plunge grinding // Advanced Materials Research. V. 690 693. – 2013. P. 2442-2445.
7. Shipulin L.V., Dyakonov A.A., Al-Aqeeli M.M. Development of Module for Automated Abrasive Tool Selection on High-speed Machining Operation // Procedia Engineering. V. 206. – 2017. P. 1211-1214.
8. Shipulin L.V., D'Yakonov A.A. Imitation Model of Forecasting Surface Relief When Forming it during Cylindrical Grinding // Procedia Engineering. V.50. – 2016. P. 936-941.
9. Ardashev D.V., Shipulin L.V. Simulation of grinding with wear of the abrasive grains // Russian Engineering Research. V. 37(2). – 2017. P. 150-153.
10. Ardashev D.V., Guzeev V.I. Variative designing of grinding operations // Russian Engineering Research, V. 37(5). – 2017. P. 459-461.
11. D'yakonov A.A., Effective cutting conditions in abrasive machining, Russian Engineering Research. 34(12) (2014) 778–780.
12. Ardashev D.V. Cutting Conditions in Manual and Semiautomatic Grinding and Finishing Machines: A Handbook, Izd. ATOKSO, Chelyabinsk, 2007.
13. Guzeev V.I., Nurkenov A. Kh. Researching the CNC-Machine Stiffness Impact on the Grinding Cycle Design // Procedia Engineering, Volume 150, 2nd International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016; Chelyabinsk. Russian Federation. 2016, P. 815-820.
14. Guzeev V.I., Nurkenov A. Kh. Calculation of Technological Limits in Designing High-Speed Operations // Procedia Engineering V.206, – 2017. P. 1221-1226.
15. Guzeev V.I., Nurkenov A. Kh. Designing the plunge-grinding cycle on the basis of the rigidity of the technological system // Russian Engineering Research, V. 35(2), – 2015. P. 150-153.