

УДК 628.517.2

DOI: 10.30987/article\_5bf8151e912aa3.24761645

**Гусев В.Г.**, д.т.н.,

(Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых,  
600000, г. Владимир, ул. Горького, 87)

E-mail: prof\_gusev@mail.ru

## **Технология и инструмент для одновременного предварительного и окончательного фрезерования прерывистых наплавленных поверхностей**

*В статье проанализированы технология и конструкции фрез для торцевого фрезерования и вскрыты их недостатки. Разработан комбинированный режущий инструмент, который позволяет выполнять предварительное и окончательное торцевое фрезерование наплавленных поверхностей в течение одного рабочего хода, уменьшить шероховатость и повысить производительность механической обработки.*

**Ключевые слова:** торцевое фрезерование; наплавленная поверхность; комбинированная фреза; распределение припуска; шероховатость; производительность.

**Gusev V.G.**, Dr. Sc. Tech.

(Stoletovs State University of Vladimir, 87, Gorky Str., Vladimir, 600000)

## **Technology and tools for simultaneous preliminary and finish milling of intermittent weld surfaces**

*The paper reports the analysis of technology and design of milling cutters for face milling and their drawbacks are defined. There is developed a combined cutter which allows carrying out weld surface preliminary and finish face milling in the course of one pass, reducing roughness and increasing machining productivity.*

**Keywords:** face milling; weld surface; combined milling cutter; allowance distribution; roughness; productivity.

Железнодорожные составы играют доминирующую роль в транспортировании людских и материальных ресурсов. Их узлы и детали в процессе эксплуатации подвергаются значительным гравитационным, инерционным и другим нагрузкам. Ввиду больших масс корпусные изношенные детали железнодорожных вагонов заменять на вновь изготовленные экономически нецелесообразно, поэтому их подвергают ремонтному восстановлению путем наплавки изношенных рабочих поверхностей и последующей механической обработки.

Так, боковая рама 1 (рис. 1, а) железнодорожного вагона имеет буксовые проемы 2, боковые щеки 3, 4 и опорные площадки 5 кото-

рой подвергают наплавке износостойкой легированной сталью 20Г1ФЛ. Твердость материала заготовки составляет 216...220 НВ, а подлежащего механической обработке наплавленного поверхностного слоя – 300...310 НВ.

В качестве износостойкого материала для наплавки изношенных поверхностей рамы используют также твердый сплав, при этом твердость наплавленного поверхностного слоя достигает 400...410 НВ, что вызывает при механической обработке уменьшение периода стойкости, повышенный износ и большой расход дорогостоящего режущего инструмента.

Кроме этого, после наплавки поверхностей 1, 2 остаются значительные геометрические

неровности (рис. 1, б), вследствие чего припуск под торцовое фрезерование распределяется неравномерно по всей поверхности. Наплавленные участки 1 и 2 отделены друг от друга необрабатываемой поверхностью 3, расположенной в углублении, в результате чего обрабатываемая наплавленная поверхность становится прерывистой, что приводит в процессе торцового фрезерования к жесткому контактному взаимодействию участков 1 и 2 с дискретно расположенными режущими зубьями инструмента.

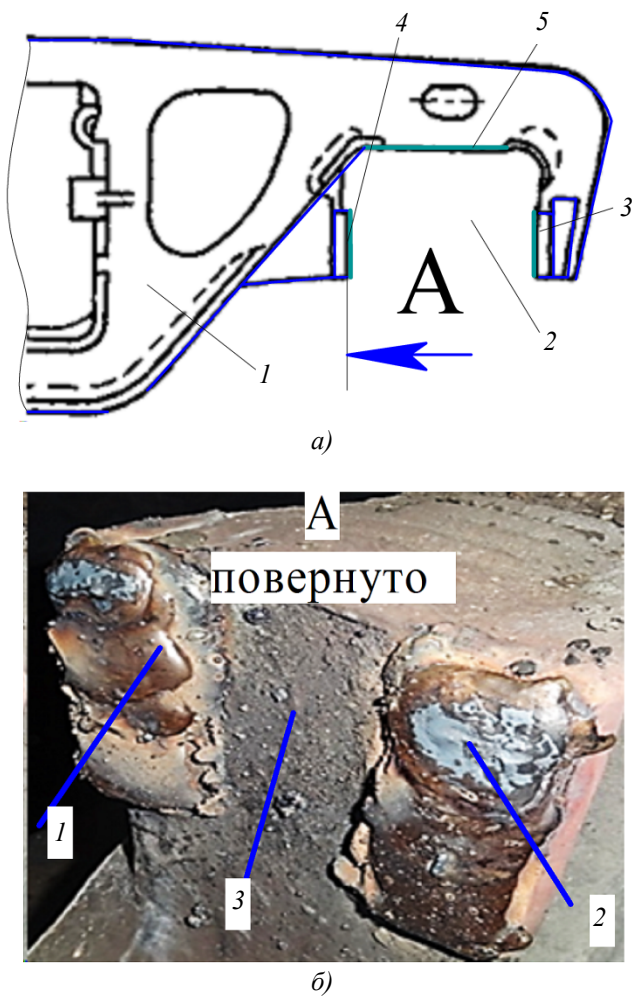


Рис. 1. Фрагмент боковой рамы (а) железнодорожного вагона и геометрические неровности поверхностей после наплавки (б)

Создаются тяжелые условия резания, при которых происходит контактное взаимодействие двух прерывистых поверхностей (режущего инструмента и заготовки). Последнее обстоятельство вызывает высокую динамическую активность технологической системы, негативно сказывающуюся на выходных параметрах качества обработанной поверхности

и снижении производительности процесса торцового фрезерования.

Снятие нестабильного по величине и твердости припуска известными торцовыми фрезами [1, 2] осуществляется за один проход, при этом каждый зуб фрезы вступает в контакт с заготовкой при максимальной глубине резания, что вызывает значительные силы резания и интенсивные удары инструмента по заготовке. При выходе из обрабатываемого материала действие зуба на заготовку прекращается, поэтому при выполнении единичного цикла резания фреза и заготовка испытывают переменное силовое воздействие в интервале от максимального до минимального значения.

Под действием максимальной силы резания  $P_{max}$  фреза и заготовка упруго деформируются, при этом суммарная максимальная величина их упругих перемещений определяется по формуле

$$y_{\Sigma} = \frac{\Sigma P_{y_{max}}(J_f + J_z)}{J_f J_z}, \quad (1)$$

где  $\Sigma P_{y_{max}}$  – максимальное значение составляющей силы резания, перпендикулярной обработанной поверхности;  $J_f, J_z$  – соответственно жесткость шпинделя с установленной торцовой фрезой и обрабатываемой заготовкой в направлении, перпендикулярном обработанной поверхности.

При минимальном значении силы резания упругие перемещения уменьшаются, но при контакте с заготовкой следующего зуба они вновь возрастают до максимального значения. Возникают вынужденные колебания элементов технологической системы, обусловленные не только упомянутыми ранее ударами инструмента, но и непостоянством силы резания–трения.

Вибрация элементов технологической системы усугубляется прерывистостью наплавленных поверхностей 1 и 2. Импульс ударной силы режущего зуба фрезы по заготовке при обработке прерывистой наплавленной поверхности определяется по формуле

$$S_{ud} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} F d\tau, \quad (2)$$

где  $F$  – ударная сила;  $\tau_1 - \tau_2$  – продолжительность удара;  $\tau_1, \tau_2$  – момент времени, соответствующий началу и окончанию удара соответственно.

Ударная сила  $F$  в начале контакта зуба фрезы с обрабатываемым материалом определяется мгновенной силой резания, возникающей

в момент врезания зуба в заготовку на полную глубину. Для сравнения известной и предлагаемой технологий торцового фрезерования наплавленных поверхностей в качестве ударной силы можно использовать максимальное значение силы резания  $\Sigma P_{y_{max}}$ , которое определяется по зависимостям, представленным в работе [3].

Из уравнений (1) и (2) следует, что уменьшение упругих перемещений  $U_{\Sigma}$ , а, следовательно, динамической активности технологической системы возможно не только путем снижения абсолютных значений силы резания  $\Sigma P_{y_{max}}$  и импульсов ударной силы  $S_{ud}$ , но и пределов их изменения. Поскольку режущие пластины в известных конструкциях торцовых фрез расположены в один ряд, то уменьшения  $\Sigma P_{y_{max}}$  и  $S_{ud}$  можно достигнуть снятием припуска за два и более проходов, либо назначением низких режимов резания. Оба варианта приводят к уменьшению производительности, что сказывается на повышении технологической себестоимости механической обработки наплавленных поверхностей.

Снятие общего припуска  $z_0$  за один проход фрезы и одновременное уменьшение максимального значения силы резания  $\Sigma P_{y_{max}}$  можно обеспечить путем деления припуска  $z_0$  на части, однако известные конструкции фрез [1, 2] исключают реализацию такой возможности.

При делении припуска на части его снятие происходит более толстыми и узкими стружками, а без деления – более тонкими и широкими. Второй случай обработки протекает при более высоком уровне вибрации элементов технологической системы и характерен для известных фрез [4].

Таким образом, известной технологии и торцовым фрезам для обработки наплавленных поверхностей свойственны существенные недостатки: значительные абсолютные значения и пределы изменения силы резания, жесткие удары режущих зубьев по заготовке и невозможность деления общего припуска на части при выполнении однопроходной обработки, что вызывает повышенный уровень вибрации элементов технологической системы, необходимость уменьшения режимов резания и производительности процесса торцового фрезерования.

Для устранения отмеченных недостатков известной технологии и инструментов разработаны комбинированные торцовые фрезы [5, 6]. Преимущества комбинированного режущего инструмента для механической обработки отверстий корпусных деталей, по сравнению с

обычным инструментом, изложены в работе [7].

Комбинированная фреза представляет собой корпус 1 (рис. 2, а), в гнездах которого установлены многогранные неперетачиваемые твердосплавные пластины 2 и 3 MC221 отечественного производства.

Режущие пластины 2 образуют вертикальный ряд, а пластины 3 – горизонтальный. Оба ряда режущих пластин взаимно перпендикулярны. Между корпусом 1 и режущими пластинами 3 горизонтального ряда расположены опорные пластины 4 (рис. 2, б), которые предохраняют корпус 1 от износа. Опорные пластины расположены также между корпусом 1 и режущими пластинами 2 вертикального ряда.

Режущие и опорные пластины обоих рядов крепятся в гнездах корпуса с помощью винтов 5 и двух гаек 6. Комбинированная фреза снабжена кольцом 7 (рис. 2, в), которое служит для поджатия к корпусу наиболее нагруженных режущих пластин 3 горизонтального ряда. Кольцо 7 крепится к корпусу с помощью винтов 8 и воспринимает ударные нагрузки от режущих пластин.

Режущие пластины 3 горизонтального ряда расположены в осевом направлении на более удаленном расстоянии от обработанной плоской поверхности, чем режущие пластины 2 вертикального ряда. Кроме этого, вершины режущих пластин 3 выдвинуты в радиальном направлении на больший радиус, чем вершины режущих пластин 2, что обеспечивает опережающее снятие припуска пластинами 3. Пластины 2 вертикального ряда вступают в работу с некоторой задержкой по времени (после снятия стружки впереди работающими пластинами 3), что обеспечивает одновременное предварительное и окончательное торцовое фрезерование наплавленных поверхностей.

Такое конструктивное оформление комбинированного режущего инструмента позволяет распределять в широких пределах общий припуск  $z_0$  между режущими пластинами обоих рядов и проводить одновременно черновую обработку зубьями горизонтального ряда и чистовую обработку – зубьями вертикального ряда. При этом сокращается номенклатура торцовых фрез: вместо черновой и чистовой фрез требуется одна комбинированная фреза.

Выполнен расчет главной  $P_z$  и радиальной  $P_y$  составляющих силы резания для известной и комбинированной торцовых фрез по формулам [3]:

$$P_z = \frac{C_p t^x S_z^y B^u z}{D^q n^w} K_p, \quad (3)$$

$$P_y = (0,3 - 0,5) P_z, \quad (4)$$

где  $C_p$ ,  $x$ ,  $y$ ,  $u$ ,  $q$ ,  $w$  – постоянный коэффициент и показатели степени при глубине резания  $t$ , подаче на зуб  $S_z$ , ширине фрезерования  $B$ , диаметре  $D$  фрезы и частоте вращения  $n$ ;  $z$  – число зубьев фрезы;  $K_p$  – поправочный коэффициент на силу резания.

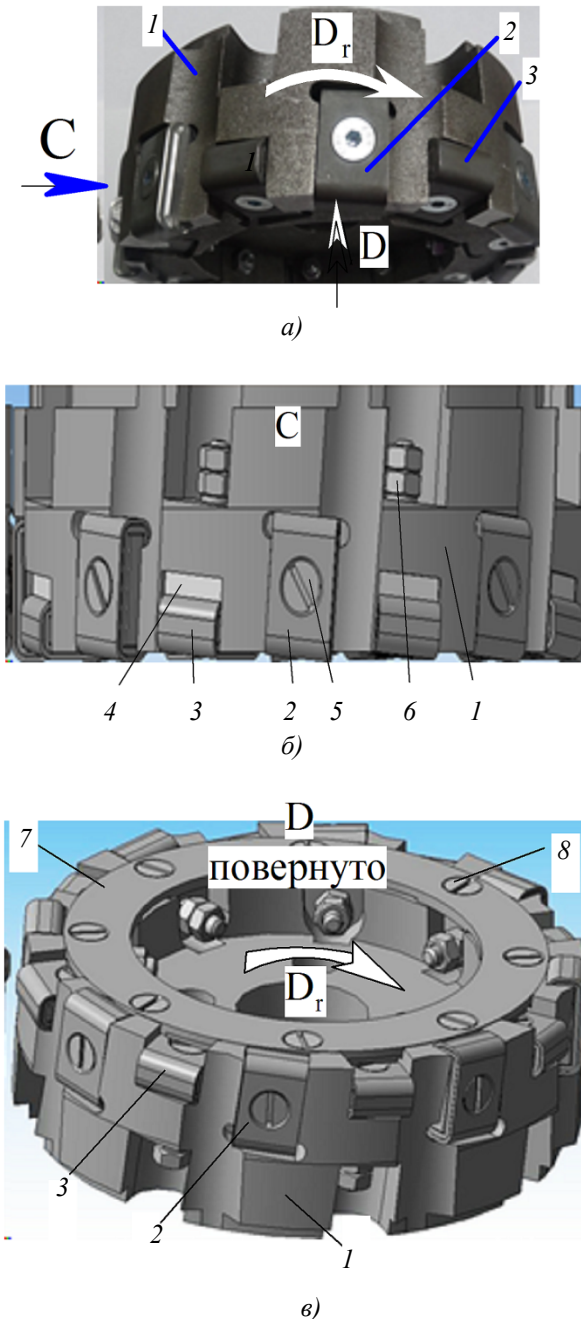


Рис. 2. Реальная модель комбинированной торцевой фрезы со взаимно перпендикулярными рядами твердосплавных режущих пластин:

*a* – вид спереди; *b* – вид *C* сбоку; *c* – вид *D* снизу

На основании полученных результатов расчета построены графики зависимости главной  $P_z$  и радиальной  $P_y$  составляющих силы резания в функции времени выполнения полного цикла обработки наплавленных поверхностей 1 и 2 каждой из сравниваемых торцевых фрез: врезание инструмента на полную глубину резания (рис. 3, время  $\tau = 0...5$  с); резание со сравнительно стабильным изменением снимаемого припуска ( $\tau = 6...25$  с); выход инструмента из контакта с обрабатываемым материалом ( $\tau = 30...35$  с). Полное время цикла фрезерования поверхностей 1 и 2 составляет 30...32 с. Оно определено расчетным путем на основании известных размеров этих поверхностей и режима торцевого фрезерования.

В условиях производства контакт режущих пластин стандартной фрезы протекает с максимальной глубиной резания 8,5 мм, а при обработке комбинированной фрезой происходит деление припуска между зубьями горизонтального и вертикального рядов, что приводит к уменьшению глубины резания, а, следовательно, и силы резания. Графики (рис. 3) построены для равного распределения общего припуска между зубьями горизонтального и вертикального ряда, т.е. каждый зуб комбинированной фрезы контактировал с заготовкой при глубине резания 4,25 мм. Точки, нанесенные на графиках, характеризуют расчетные значения главной  $P_z$  и радиальной  $P_y$  составляющих силы резания.

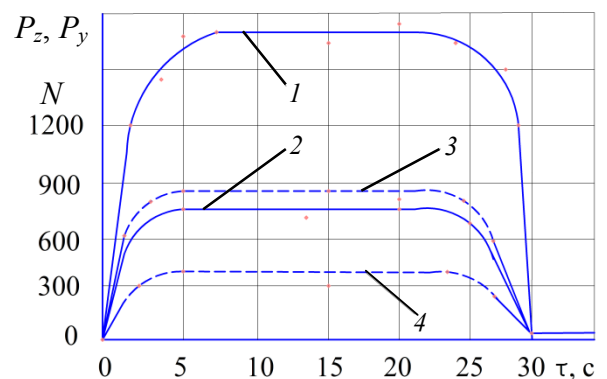


Рис. 3. Изменение главной и радиальной составляющих силы резания при торцевом фрезеровании наплавленных поверхностей боковой рамы: 1 и 2 – известной; 3 и 4 – комбинированной фрезой

Главная  $P_z$  и радиальная  $P_y$  составляющие силы резания при обработке известной фрезой (см. рис. 3, кривые 1 и 2 соответственно)

больше, чем при обработке комбинированной фрезой (пунктирные кривые 3 и 4), что согласно выражению (1) приводит во втором случае к уменьшению суммарных упругих перемещений фрезы и заготовки и снижению уровня вибрации технологической системы.

Значительное уменьшение составляющих силы резания при обработке комбинированной фрезой позволяет снизить энергию ударов режущих зубьев комбинированной фрезы по заготовке, а, следовательно, и динамическую активность технологической системы. Из этого следует, что фрезу с делением общего припуска между режущими зубьями вертикального и горизонтального рядов наиболее целесообразно использовать, в первую очередь, при обработке прерывистых поверхностей со стохастически  $z_0$  изменяющимся по величине и твердости припуском.

Кроме этого, разработанная фреза позволяет изменять в осевом направлении расстояние между режущими пластинами горизонтального и вертикального рядов, то есть изменять глубину резания пластинами каждого из рядов. Изменение упомянутого расстояния осуществляется изменением толщины опорных пластин 4, что в практической реализации не представляет какой-либо технической или технологической сложности и может обеспечиваться с точностью единиц микрометров путем выполнения операции обычного шлифования пластин 4.

Если общий припуск разделить поровну между режущими зубьями горизонтального и вертикального рядов, то будет происходить предварительная обработка, при которой максимальное значение силы резания  $\Sigma P_{y_{max}}$  уменьшается в два раза, что приведет, кроме уменьшения упругих перемещений  $u_z$ , также к снижению ударной силы и уровня вибрации элементов технологической системы.

Если распределить общий припуск  $z_0$  между зубьями обоих рядов неравномерно, отдавая, например, зубьям горизонтального ряда 95...97 %, а зубьям вертикального ряда 3...5 % общего припуска, то комбинированная торцовая фреза будет выполнять одновременно как черновую, так и чистовую обработку наплавленных поверхностей за один рабочий ход.

Последнее обстоятельство позволяет не только использовать одну разработанную торцовую фрезу взамен черновой и чистовой известных фрез, но и сократить вспомогательное время на снятие черновой фрезы со шпинделя, установку чистовой фрезы, настройку ее на

требуемый размер и др., что также способствует повышению производительности процесса торцового фрезерования разработанной фрезой.

Таким образом, предложенная технология и конструкция торцовой фрезы позволяют снизить динамическую активность технологической системы, что положительно отражается на качестве обработанных поверхностей, и существенно расширяет технологические возможности торцового фрезерования по сравнению с существующими, обеспечивая при этом повышение производительности технологической операции.

Каждая из фрез [5, 6] для одновременной черновой и чистовой обработки изготовлены в металле, что позволило провести производственные испытания предложенной технологии и режущего инструмента в производственных условиях. Использовали фрезерный станок ФБ-03/2, выпущенный ООО НПО «Экспериментальный завод» (г. Реж, Свердловская обл.) и предназначенный для обработки наплавленных поверхностей рам железнодорожных вагонов.

Целью испытаний была проверка сформулированных выше положительных сторон разработанной технологии и комбинированной фрезы по сравнению с применяемыми в производственных условиях на операции торцового фрезерования наплавленных поверхностей боковой рамы.

На шпиндель станка ФБ-03/2 поочередно устанавливали известную и комбинированную торцовые фрезы. Параметры фрез: диаметр 175 мм, число режущих зубьев – 16. Испытания проведены на следующих режимах резания: общий припуск на обработку  $z = 7,2...8,5$  мм; скорость резания  $v = 115$  м/мин; частота вращения  $n = 210$  мин<sup>-1</sup>; минутная рабочая подача фрезы  $S = 58...120$  мм/мин. Общий припуск снимали известной и разработанной фрезами за один проход при ширине фрезерования  $B = 120$  мм. Ширина и длина каждой из обрабатываемых наплавленных поверхностей 1 и 2 боковой рамы (см. рис. 1, вид А) составляет 120 и 160 мм соответственно. Углубление 3, создающее прерывистость обрабатываемых наплавленных поверхностей 1 и 2, имеет ширину 70 мм и длину 120 мм. Шероховатость обработанных поверхностей боковой рамы по параметру  $R_z$  не должна превышать 160 мкм.

Эффективность предложенной технологии и комбинированного режущего инструмента оценивали производительностью процесса обработки, величиной шероховатости обрабо-

таных поверхностей, уровнем вибрации передней опоры шпиндельного узла станка с закрепленной фрезой, а также силой электрического тока, потребляемого электродвигателем главного движения инструмента на холостом ходу и под нагрузкой, т.е. в процессе торцового фрезерования.

Для оценки производительности технологической операции измеряли основное и вспомогательное время, затрачиваемое на выполнение операции торцового фрезерования. Уровень вибрации передней опоры шпинделя измеряли виброизмерительным прибором «АГАТ», при этом использовали сейсмический пьезоэлектрический датчик, установленный на подготовленную площадку корпуса шпиндельного узла.

В результате проведенных испытаний установлено, что применение разработанной технологии и торцовой фрезы с двумя взаимно перпендикулярными рядами режущих пластин, обеспечивающей деление снимаемого припуска, позволило следующее: уменьшить высоту неровностей  $R_z$  обработанной поверхности на 80 %, потребляемую мощность привода главного движения на 20 %, уровень вибрации передней опоры шпинделя с фрезой на 30 % и увеличить производительность торцового фрезерования наплавленных поверхностей на 25 %.

Уменьшение параметра  $R_z$  обработанной поверхности достигнуто при распределении общего припуска  $Z_{\Sigma} = 8,5$  мм следующим образом: пластины горизонтального ряда снимали 8,0...8,4 мм; вертикального ряда – 0,1...0,5 мм, что соответствовало режиму черного и чистового фрезерования, соответственно, пластинами горизонтального вертикального ряда.

При равном распределении общего припуска между режущими пластинами горизонтального и вертикального ряда шероховатость поверхности снизилась, по сравнению с обработкой известной фрезой, на 15 %, что объясняется выполнением черного фрезерования режущими пластинами обоих рядов с глубиной резания 4,25 мм. При равном распределении общего припуска наряду со снижением параметра  $R_z$  уменьшились также мощность резания и уровень вибрации шпиндельного узла с установленной комбинированной фрезой.

Полученные результаты испытаний обусловлены делением припуска между двумя рядами режущих пластин комбинированной торцовой фрезы, уменьшением силовой нагрузки на технологическую систему, внешнего

динамического воздействия инструмента на обрабатываемую заготовку, уровня вибрации, а также расширением технологических возможностей инструмента.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. №2414333 ФРГ, МПК В23С 5/06. Фрезерная головка / Клётцер Ральф, Кляйн Гельмут, Хейнлос Маркус; заявл. 21.11.2006, опубл. 20.03.2011,
2. Пат. 2102199 РФ, МПК В23С 5/00. Сборная торцовая фреза / Бурочкин Ю.П.; заявл. 18.08.1994, опубл. 20.01.1998
3. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х томах. Т.2 / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Сулова, А.Г. Косиловой и др. – М.: Машиностроение, 2001. – ISBN 5-94275-015-7.
4. Гусев, В.Г., Симаков, А.Г. Анализ схем торцового фрезерования прерывистых поверхностей // СТИН. – 2013. – № 6. – С. 27- 30.
5. Пат. 2482941 РФ, МПК В23С 5/06. Сборная торцовая фреза / Гусев В.Г., Симаков А.Г., заявл. 26.09.2011, опубл. 27.05.2013, бюл. № 15.
6. Пат. 130529 РФ, МПК В23С 5/06. Торцовая фреза для комбинированной обработки / Гусев В.Г., Симаков А.Г., заявл. 20.02.2013, опубл. 27.07.2013, бюл. № 21.
7. Гусев, В.Г. Эффективная технология обработки наплавленных поверхностей корпусных деталей // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2018. – № 2(80). – С. 14-20.

## REFERENCES

1. Pat. No. 2414333 BRD, IPC B23C 5/06. Milling Head / Ralf Kloetzer, Helmut Klein, Markus Heinlos; applied 21.11.2006, published 20.03.2011,
2. Pat. 2102199 the RF, IPC B23C 5/00. Precast End Mill / Burochkin Yu.P.; applied 18.08.1994, published 20.01.1998
3. *Reference Book of Technologist-Machinist*. In 2 Volumes. Vol.2 / under the editorship of A.M. Dalsky, A.G. Suslov, A.G. Kosilova et al. – M.: Mechanical Engineering, 2001. – ISBN 5-94275-015-7.
4. Gusev, V.G., Simakov, A.G. *Analysis of Intermittent Surface End Milling Scheme* // STIN. – 2013. – No.6. – pp. 27-30.
5. Pat. 2482941 the RF, IPC B23C 5/06/ Prefabricated End Mill / Gusev V.G., Simakov A.G., applied 26.09.2011, published 27.05.2013, Bull. No.15.
6. Pat. 130529 the RF, IPCB23C 5/06. End Mill for Combined Milling / Gusev V.G., Simakov A.G., applied 20.02.2013, published 27.07.2013, Bull. No.21.
7. Gusev, V.G. Efficient technology of weld surface machining of body parts // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2018. – No.2(80). – pp. 14-20.

Рецензент д.т.н. В.И. Денисенко