

УДК 621.9

DOI:

М.А. Подойницын, Б.Я. Мокрицкий, А.В. Морозова, Е.Б. Мокрицкая

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТВЕРДОСПЛАВНОЙ КОНЦЕВОЙ СОСТАВНОЙ ФРЕЗЫ

Показано, что область применения дорогостоящих монокристаллических (цельных) твердосплавных фрез можно ограничить за счёт применения составных фрез, у которых хвостовик выполнен из конструкционной стали и сочленён с твердосплавной режущей частью. Это сократит долю инструмен-

тальных затрат в себестоимости изделий и снизит импортную зависимость.

Ключевые слова: монокристаллические фрезы, составные фрезы, твердосплавные концевые фрезы, снижение инструментальных затрат.

М.А. Podoinitsyn, B.Ya. Mokritsky, A.V. Morozova, E.B. Mokritskaya

IMPROVEMENT OF HARD-ALLOY END COMPOUND MILLER

The paper reports the concept, the methodology and results of the investigation of possibilities in the application of compound hard-alloy end millers equally with monolithic ones. It is shown that in the majority of operation conditions for general mechanical engineering the compound millers ensure the reduction of tool costs in the cost price of a product at the expense of tool hard alloy saving through manufacturing a miller shank with the use of cheaper material and a place of joining a shank and a cutting element ensures miller operation on high performance modes of cutting with-

out detriment to productivity and machining quality. Material costs at the expense of the reduction of tool hard alloy used are decreased by 30-70% depending on material of a shank and a miller length. The example of compound miller design is presented. The method and results of the deformation computer simulation of such a miller under different operation conditions, error values in machining with a compound miller are illustrated.

Key words: monolithic millers, compound millers, hard-alloy end millers, tool costs reduction.

Введение

В современном механообрабатывающем производстве всё более широко применяется дорогостоящее оборудование с ЧПУ. Эксплуатация такого оборудования характеризуется высокой стоимостью станко-часа и, как следствие, ужесточением условий работы режущего инструмента и увеличением доли инструментальных затрат в себестоимости выпускаемой продукции. Так, затраты на инструмент в авиастроительной отрасли уже сейчас составляют 5-10% общих затрат на обработку резанием. Это напрямую связано с высокой стоимостью инструментального материала: стоимость одного килограмма инструментального материала в сотни раз выше стоимости обрабатываемого алюминиевого сплава.

Одним из путей оптимизации затрат является совершенствование металлорежущего инструмента, в частности концевых

фрез для высокоскоростной обработки материалов. Известно решение данной задачи путем разделения конструкции фрезы на составные элементы: режущую часть из твердосплавного материала и хвостовик из конструкционного материала (как более дешевого). Данный подход к конструкции концевых фрез не является новым: в инструментальном хозяйстве хорошо известны быстрорежущие концевые фрезы по ГОСТ 17024-82, хвостовик которых изготавливается из конструкционной стали. Также известны разные [1, с. 4, 7, 13] варианты сочленения пайкой (или сваркой) твердосплавной режущей части концевой фрезы с хвостовиком, выполненным из конструкционной стали 40Х. Условно назовём такие фрезы составными. Развитие требований к процессу высокопроизводительной обработки привело к тому, что при малых диаметрах фрез теперь

применимы только монолитные (цельные) фрезы.

В настоящей работе показано, что совершенствование составных фрез возможно. Совершенствование конструкции и технологии изготовления составных фрез позволяет без ущерба производительности

Методология проведения работ

Стремление обеспечить максимальную производительность обработки твердосплавными концевыми монолитными фрезами привело вместо предпочтительного износа режущих кромок фрезы к её по-

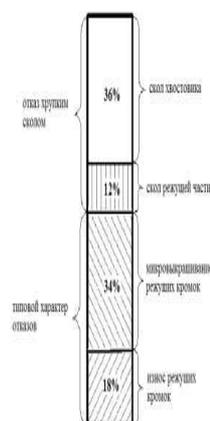
и качеству обработки ограничить область применения дорогостоящих монолитных фрез.

В подготовке результатов принимали участие Д.А.Пустовалов и В.Ю.Верещагин.

ломкам в месте крепления в патроне (рис. 1). Такой отказ не позволяет осуществить переточку фрезы. Это влечёт за собой чрезмерные затраты твёрдого сплава.



а)



б)

Рис. 1. Примеры разрушения монолитных фрез (а) и доля их разрушения по хвостовику (б)

Целью работы является снижение доли инструментальных затрат в себестоимости продукции.

Для реализации цели работы поставлены следующие задачи:

- разработать адекватную компьютерную модель напряжённо-

деформированного состояния концевых фрез, с помощью модели оценить области предпочтительного применения составных и цельных твердосплавных концевых фрез;

- исследовать и усовершенствовать технологические особенности изготовле-

ния составных концевых фрез, предложить рациональные варианты их конструкции.

Результаты решения задач изложены ниже применительно к фрезе диаметром 15 мм, режущая часть которой выполнена из инструментального твёрдого сплава ВК8. Нами не рассмотрен вариант сочленения режущей части с хвостовиком методом сварки, так как мы не смогли обеспечить нормальный характер распределения внутренних напряжений в месте сварки (хотя известно, что в городе Иркутске на авиационном заводе такие фрезы применяются). Нами также не рассмотрен вариант исполнения фрез со сменным режущим элементом (рис. 2), что освоено несколькими ведущими в мире инструментальными фирмами. Не рассмотрен в силу того, что он выходит за рамки поставленной нами цели, поскольку стоимость такой фрезы почти в 2 раза выше стоимости монолитной фрезы.

Для проведения работ использованы аттестованные, поверенные и разрешённые к применению на территории России следующие программные продукты, приборы и средства измерений:

- программы SolidWorks для численного моделирования методом конечных элементов напряжений в теле фрезы и соответствующих деформаций в различных сечениях фрез;

- адаптированный специализированный динамометр модели STD201-2 для измерения составляющих силы резания;

- разрывная машина модели INSTRON 3382 для оценки адекватности расчётных деформаций фрез методом изгиба закреплённой балки;

- видеоизмерительная машина модели MIKRO VU для оценки параметров износа фрез;

- электронные микроскопы (с приставками различного назначения) моделей Hitachi SU-70, VEGA 3 LMN для проведения фрактографических исследований субстрата и покрытий инструментальных материалов.

Идеологической платформой методологии исследования являются следующие представления.

Нет смысла доказывать, что составные твердосплавные концевые фрезы лучше монолитных фрез или наоборот. Нет смысла с дотошной скрупулёзностью подсчитывать затраты на производство составной или монолитной фрезы. Нецелесообразность проведения таких расчетов обусловлена тем, что затраты определяются уровнем применяемой технологии изготовления фрез и условиями эксплуатации фрез. У каждого производителя инструмента свои технологии, а следовательно, и свои показатели. И даже они могут быть нивелированы коммерческой практикой формирования цены на фрезы.

1. При такой постановке проблемы есть смысл сформулировать проблему более узко, руководствуясь элементарными представлениями об основных закономерностях развития технических систем. В данной работе использованы следующие представления:

- а) у фрез, выполненных из быстрорежущих инструментальных сталей, хвостовик не разрушается;

- б) у типовых составных твердосплавных фрез с хвостовиком, выполненным из конструкционной стали, хвостовик не разрушается;

- в) у насадных фрез (твердосплавная сборка насажена на хвостовик, выполненный из конструкционной стали) хвостовик не разрушается;

- г) у монолитных твердосплавных фрез затраты твердосплавного инструментального материала на единицу обработанной продукции велики из-за того, что у них превалирует утрата работоспособности путём разрушения хвостовика в месте его крепления в патроне; причин такого разрушения несколько, но сам факт скола приводит к невозвратимой утрате всей фрезы полностью, и чем больше длина фрезы, тем больше размер утраты.

2. При таком видении проблемы вполне очевидны вопросы:

А. Целесообразно ли создавать для монолитных твердосплавных фрез такие условия эксплуатации, которые приводят к столь катастрофическим утратам твёрдого сплава?

Б. Если у монолитных твердосплавных фрез разрушается преимущественно хвостовик, то что мешает выполнить хвостовик из не инструментального твёрдого сплава?

В. Если нетвердосплавные хвостовики не разрушаются, то что препятствует применению составных фрез?

3. Нет причин, исключаяющих возможность следующего предположения: для каждого вида твердосплавных концевых фрез может быть найдена рациональная область применения. Монолитные фрезы следует применять там, где нельзя обойтись другими. Вполне очевидно, что составные фрезы по жёсткости проигрывают монолитным. Проигрывают тем больше, чем больше длина хвостовика. Проигрыш состоит в точности изготовления изделий из-за прогиба фрезы на длине её консольной части. Но важна не величина самого прогиба, а величина B образующегося в результате этого прогиба отклонения обработанной поверхности детали, которая тем меньше, чем меньше протяженность этой поверхности (рис. 2).

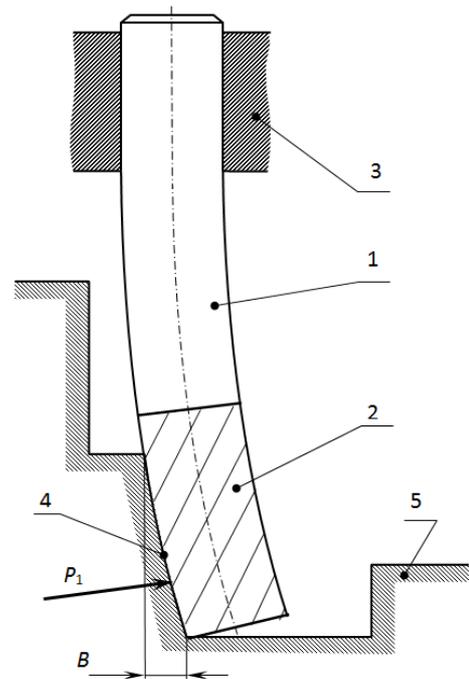


Рис. 2. Схема образования отклонения B от вертикали положения стенки обрабатываемого паза при действии радиальной составляющей P_1 силы резания: 1 – хвостовик фрезы; 2 – твердосплавная режущая часть фрезы; 3 – зажимное устройство станка; 4 – обработанная поверхность паза заготовки 5

Базовый вариант программы Solid Works для численного моделирования методом конечных элементов напряжений в теле фрезы и соответствующих деформаций в различных сечениях фрез был адаптирован под рассматриваемые условия. В частности, были рассмотрены трёхзубые фрезы длиной 90, 120 и 220 мм. При опытной апробации пилотных образцов составных фрез [2-6] выявлены пределы величины составляющей P_1 силы резания [7; 8], и она ограничена 3000 Н.

Обсуждение полученных результатов

Пример результатов расчета напряжений в теле фрезы для значения силы 3000 Н представлен на рис. 3а, из которого видно, что наибольшие напряжения возникают в зоне крепления фрезы в патроне шпинделя станка. Значения этих напряжений - на уровне $3 \cdot 10^8$ Па. Варьирование действующей на фрезу силы P_1 в диапазоне от 5 до 3000 Н с шагом 250 Н дало подобные результаты. Это свидетельствует

о том, что модель ведёт себя подобно на всём исследуемом интервале значений сил. По величинам расчётных напряжений были построены эпюры деформаций корпуса фрезы (рис. 3б). Проверка значений деформаций фрезы на разрывной машине модели INSTRON 3382 методом изгиба защемлённой балки позволила установить величину уточняющего коэффициента.

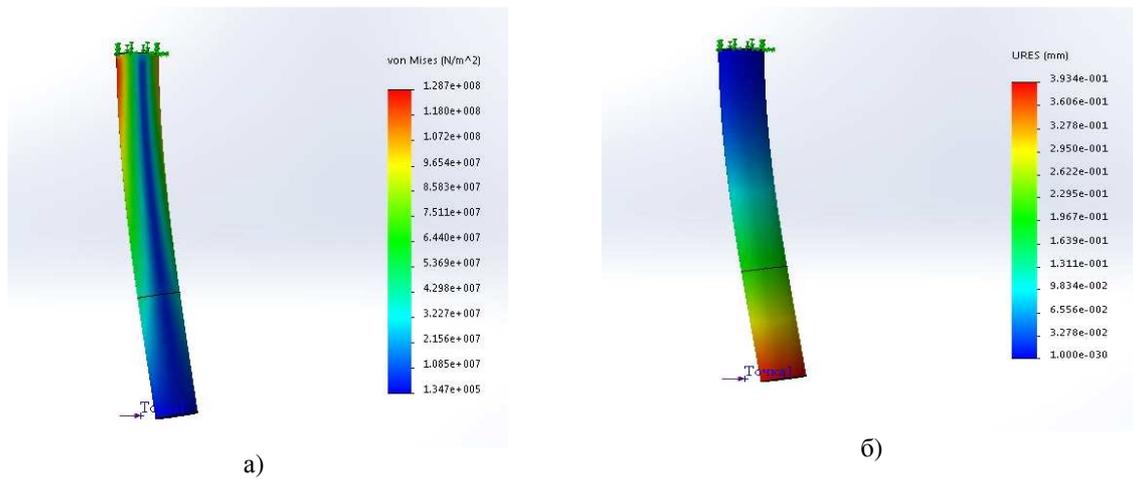


Рис. 3. Картина распределения напряжений в корпусе составной фрезы (а) и соответствующие деформации корпуса (б)

В результате ввода в модель данных о физических свойствах материалов, из которых выполнены режущая часть фрезы и её хвостовик, получены фактические ожидаемые значения отклонения (параметр В на рис. 2) условной стенки паза в обрабатываемой заготовке от её теоретического (вертикального) положения вследствие деформации корпуса монолитной и составной фрез в равных условиях эксплуатации. Иллюстрация полученных результатов приведена на рис. 4 для экстремальных условий эксплуатации концевых фрез, а именно при обработке цилиндрической поверхностью фрезы стенки паза, имеющей протяженность 40 мм.

На рис. 4 приведена информация только о трёх вариантах исполнения хвостовика составной фрезы: из конструкционной стали 40Х; инструментальной стали Р18 (из-за её высоких упругих свойств); неинструментального твёрдого сплава марки Т30К4 (из-за его высоких упругих свойств). Монолитная (цельная) фреза здесь смоделирована только из инструментального твёрдого сплава марки ВК8. Из приведённых сведений следует:

- При длине фрезы 90 мм (из этих 90 мм режущая часть занимает 45 мм, а 40 мм зажаты в патроне) различие в отклонениях монолитной (цельной) и составной фрез (рис. 4а) укладывается в один квалитет точности для деталей общемашиностроительного назначения. Различие в марке материала хвостовика тоже не носит

принципиального характера. Этот парадокс объясняется тем, что фактически изгибу подвергается корпус фрезы длиной только 50 мм, так как остальные 40 мм длины фрезы зажаты в патроне. При изменении числа зубьев фрезы (из-за изменения площади поперечного (живого) сечения фрезы) влияние материала хвостовика заметнее, но отклонения тоже не превышают 0,08 мм.

- Увеличение длины фрезы до 220 мм (рис. 4б, в) существенно меняет величины отклонений. Но различие в отклонениях монолитной (цельной) фрезы и составной фрезы, у которой хвостовик выполнен из твёрдого сплава Т30К4, не существенно. Отклонения имеют один порядок и допустимы для всех несопрягаемых поверхностей общемашиностроительных изделий, для изготовления карманов и обнизок даже ответственных деталей авиационного назначения.

Иначе говоря, монолитная фреза и составная фреза, хвостовик которой выполнен из Т30К4, конкурентны, и это заметнее с ростом длины фрезы. Оценочные расчёты показывают экономию инструментального твёрдого сплава ВК8 в десятки процентов при замене монолитных фрез на составные, что при годовой потребности в таких фрезах даёт миллионный эффект.

Полученные результаты проверены моделированием деформаций таких же фрез при более естественных условиях

эксплуатации, а именно при обработке короткой стенки паза длиной 5 мм. Получены следующие результаты:

1. Если соответственно уменьшены длина режущей части фрезы и сила резания P_1 , то конкурентность составных фрез ещё заметнее, в том числе и с хвостовиком из стали P18.

2. Если соответственно уменьшена длина режущей части фрезы, но режим резания форсирован до прежнего значения силы резания P_1 , то эффективность применения составных фрез снижается и нивелируется.

При обосновании рациональности применения составных фрез в тех или иных условиях эксплуатации встал вопрос о выборе конструкции фрезы, позволяющей просто и экономично с применением пайки сочленить режущую часть фрезы с хвостовиком. Ниже кратко описан один из вариантов.

Твердосплавная концевая составная фреза с призматическим сочленением (рис. 5) состоит из режущей части 1, выполненной из инструментального твёрдого сплава, например марки ВК8, которая содержит режущие зубья 2 на цилиндрической и торцевой поверхностях и призматическую поверхность 3, предназначенную для сочленения с хвостовиком 4, имеющим соответствующую призматическую поверхность 5.

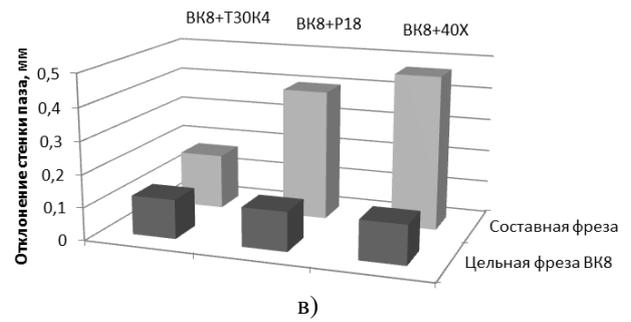
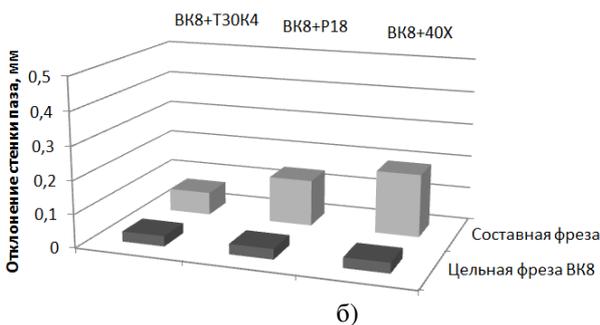
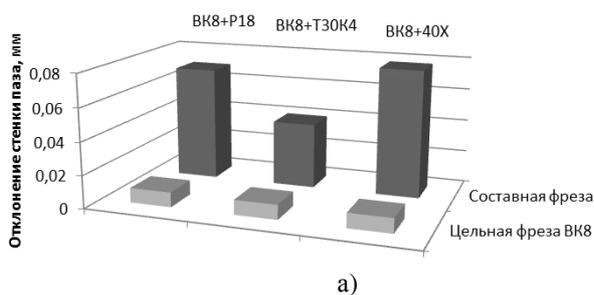


Рис. 4. Сравнительные номограммы величин отклонения стенки паза, имеющей протяжённость 40 мм, при длинах фрез: а - 90 мм; б - 120 мм; в - 220 мм

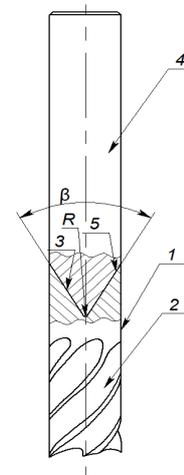


Рис. 5. Конструктивная схема фрезы

Угол β при вершине призмы и радиус R выбраны конструктивно. Примеры материалов, из которых выполнен хвостовик, показаны ранее на рис. 4. Хвостовик 4 и режущая часть 1 соединены пайкой. Соединение режущей части 1 с хвостовиком 4 в виде призматического сочленения технологически просто исполнимо, позволяет передать значительные крутящие моменты (т.е. обеспечить высокопроизводительную обработку). Ликвидация погрешностей положения хвостовика и режущей части, образующихся после пайки, обеспечивается за счёт того, что обработка их наружного диаметра в размер производится после пайки с последующим формированием режущих зубьев.

Оценочные расчёты показали, что технологические издержки на изготовление места сочленения составляют от 3 до 5% от себестоимости фрезы при её диаметре от 5 до 20 мм. При этом затраты на материал за счёт сокращения количества используемого инструментального твёрдого сплава сокращаются в сравнении с мо-

нолитной фрезой на 30...70% (в зависимости от материала хвостовика и длины фрез-

Заключение

В работе показано, что повсеместное использование дорогостоящих монолитных концевых твердосплавных фрез не оправдано. Им конкурентны составные твердосплавные фрезы. Речь не идёт о вытеснении монолитных фрез: их применение оправдано там, где составные не могут

работать из-за их сниженной жёсткости. Но в большей части области сегодняшнего применения монолитных фрез они могут быть заменены без ущерба качеству и производительности обработки более дешёвыми составными фрезами.

работают из-за их сниженной жёсткости. Но в большей части области сегодняшнего применения монолитных фрез они могут быть заменены без ущерба качеству и производительности обработки более дешёвыми составными фрезами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 18372-73. Фрезы концевые твердосплавные. Технические условия. - Переизд. с изм. № 1 и 2. - М.: Госкомитет СССР по стандартам: Изд-во стандартов, 1984.
- Пат. на полез. модель 154597 РФ, МПК В23С5/10. Фреза концевая составная с центрирующим пояском / Мокрицкий Б.Я., Пустовалов Д.А., Панова Е.А., Мокрицкая Е.Б., Саблин П.А., Кваша В.Ю.; патентообладатель Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. - № 2015108187/02; заявл. 10.03.15; опубл. 27.08.15, Бюл. № 24.
- Пат. на полез. модель 154595 РФ, МПК В23С5/10. Фреза концевая составная с пояском и шлицем / Мокрицкий Б.Я., Пустовалов Д.А., Панова Е.А., Мокрицкая Е.Б., Кваша В.Ю.; патентообладатель Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. - № 2015108200/02; заявл. 10.03.15; опубл. 27.08.15, Бюл. № 24.
- Пат. на полез. модель 154596 РФ, МПК В23С5/10. Фреза концевая составная с центрирующим конусом / Мокрицкий Б.Я., Пустовалов Д.А., Панова Е.А., Верещагина А.С., Кваша В.Ю.; патентообладатель Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. - № 2015108180/02; заявл. 10.03.15; опубл. 27.08.15, Бюл. № 24.
- Пат. на полез. модель 154594 РФ, МПК В23С5/10. Фреза концевая составная с пояском и крестовым шлицем / Мокрицкий Б.Я., Пустовалов Д.А., Панова Е.А., Алтухова В.В., Мокрицкая Е.Б., Кваша В.Ю.; патентообладатель Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. - № 2015108174/02; заявл. 10.03.15; опубл. 27.08.15, Бюл. № 24.
- Пат. на полез. модель 154593 РФ, МПК В23С5/10. Фреза составная с центрирующим конусом и шлицевым соединением / Мокрицкий Б.Я., Пустовалов Д.А., Панова Е.А., Алтухова В.В., Саблин П.А., Кваша В.Ю.; патентообладатель Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. - № 2015108181/02; заявл. 10.03.15; опубл. 27.08.15, Бюл. № 24.
- Мокрицкий, Б.Я. Моделирование напряжений и деформаций твердосплавных концевых фрез / Б.Я.Мокрицкий, А.С.Верещагина, В.Ю.Верещагин // Учёные записки КнАГТУ. - 2016. - № 1(25). - С. 82-87.
- Мокрицкий, Б.Я. Составные концевые фрезы как альтернатива цельным и сборным твердосплавным концевым фрезам / Б.Я.Мокрицкий, В.Ю.Верещагин, Е.Б.Мокрицкая, С.А.Пячин, С.В.Белых, А.С.Верещагина // СТИН. - 2016. - № 6. - С. 7-10.
- Utility Model Patent* 154596 RF, IPC B23C5/10. End compound miller with centering cone / Mokritsky B.Ya., Pustovalov D.A., Panova E.A., Vereshchagina A.S., Kwasha V.Yu.; patent holder: Komsomolsk-upon-Amur State Technical University - № 2015108180/02; applied 10.03.15; published 27.08.15, Bull. № 24.
- Utility Model Patent* 154594 RF, IPC B23C5/10. End compound miller with girdle and cross slot / Mokritsky B.Ya., Pustovalov D.A., Panova E.A., Altukhova V.V., Mokritskaya E.B., Kwasha V.Yu.; patent holder: Komsomolsk-upon-Amur State Technical University - № 2015108174/02; applied 10.03.15; published 27.08.15, Bull. № 24.
- Utility Model Patent* 154593 RF, IPC B23C5/10. Compound miller with centering cone and slot joint / Mokritsky B.Ya., Pustovalov D.A., Panova E.A., Altukhova V.V., Sablin P.A., Kwasha V.Yu.; patent

holder: Komsomolsk-upon-Amur State Technical University - № 2015108181/02; applied 10.03.15; published 27.08.15, Bull. № 24.

7. Mokritsky, B.Ya. Simulation of stresses and deformations in hard alloy end millers / B.Ya.Mokritsky, A.S.Vereshchyagina, V.Yu.Vereshchyagin // *Proceedings of KnASTU*. – 2016. - № 1(25). - p. 82-87.

8. Mokritsky, B.Ya. *Compound End Millers as Alternative for Integral and Combined Hard Alloy End Millers* / B.Ya.Mokritsky, V.Yu.Vereshchagin, E.B.Mokritskaya, S.A.Pyachin, S.V.Belykh, A.S.Vereshchagina // *STIN*. – 2016. - № 6. - pp. 7-10.

Статья поступила в редколлегию 1.10.2016.

*Рецензент: д.т.н., профессор
Комсомольского-на-Амуре государственного
технического университета
Евстигнеев А.И.*

Сведения об авторах:

Подойницын Максим Антонович, магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, e-mail: max2128@zoho.com.

Мокрицкий Борис Яковлевич, профессор кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, e-mail: boris@knastu.ru.

Podoinitsyn Maxim Antonovich, Applicant for Master's degree of Komsomolsk-upon-Amur State Technical University, e-mail: max2128@zoho.com.

Mokritsky Boris Yakovlevich, Prof. of the Dep. "Engineering Techniques", Komsomolsk-upon-Amur State Technical University, e-mail: boris@knastu.ru.

Морозова Анна Валентиновна, к.социол.н., Брянский государственный технический университет,

тел.: 8-919-202-70-07, e-mail: niotiestu@gmail.com.

Мокрицкая Елена Борисовна, доцент кафедры «Вычислительные системы» Дальневосточного федерального университета, тел.: 8-914-177-26-21, e-mail: mokritskayae@mail.ru.

Morozova Anna Valentinovna, Can. Sociol., Bryansk State Technical University, e-mail: niotiestu@gmail.com.

Mokritskaya Elena Borisovna, Assistant Prof. of the Dep. "Computer Systems", Far-Eastern Federal University, e-mail: mokritskayae@mail.ru.