

УДК 62-226:621.51

**ОБЗОР ПРОГРЕССИВНЫХ МЕТОДОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОСЕВЫХ
МОНОКОЛЕС АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ****Лунев А.Н., Курьлев Д.В.***ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ», Казань, e-mail: dvkurylev@kai.ru*

В связи с современной тенденцией применения осевых моноколес вместо обычной конструкции в авиационных газотурбинных двигателях существует необходимость всесторонней оценки различных вариантов для производства турбинных колес. Таким образом, в данной работе рассматриваются различные методы изготовления моноколес блисковой конструкции. Вместе с обычным фрезерованием и электрохимической обработкой также приводятся альтернативные технологии производства, такие как лазерная наплавка, резка струей воды и обработка кольцевой фрезой. Оценка различных цепочек процесса проводится на основе данных, полученных в различных источниках. Выявлено отсутствие оптимальных технологий изготовления и ремонта моноколес блисковой конструкции, отвечающей всем требованиям и критериям. А также анализ показал, что альтернативные технологии более эффективны по сравнению с традиционным фрезерованием.

Ключевые слова: обзор, осевое моноколесо, обработка кольцевой фрезой**REVIEW OF PROGRESSIVE METHODS FOR MANUFACTURE
OF THE AXIAL BLISKS OF THE AVIATION GAS TURBINE ENGINES****Lunev A.N., Kurylev D.V.***Federal State Educational Institution of Higher Professional Education «Kazan National Research
Technical University named after A.N. Tupolev – KAI», Kazan, e-mail: dvkurylev@kai.ru*

Due to the modern trend of blisk demands instead of the conventional design in aviation gas turbine engines need for a comprehensive assessment of the various options for the production of turbine wheels. Therefore, in this paper different methods of blisks manufacturing are reviewed. Beside conventional milling and electrochemical machining also alternative manufacturing technologies like laser cladding and water jet cutting and cup milling are reported. Evaluation of various chains process is carried out on the based of data obtained from different sources. The lack of optimal technology manufacturing and repair blisks, which meets all the requirements and measures, was revealed. Also, analysis showed that the alternative technologies more effective than traditional milling.

Keywords: review, blisk, cup milling

Современные авиационные газотурбинные двигатели должны отвечать требованиям относительно надежности, минимального веса, высокой эффективности, экономичности и долговечности. Ротор компрессора является одним из главных элементов его конструкции. Использование моноколес (блисков) позволяет добиться снижения массы конструкции до 25% от исходного и повысить критическое число оборотов [4].

Блиск – это рабочее колесо, в котором лопатки выполнены с диском за одно целое. Главное преимущество «блисковой» конструкции – отсутствие трудозатратных замковых соединений лопаток с диском, а также отсутствием проблем, связанных с обеспечением прочности и долговечности машины (концентрация напряжений в замковых пазах дисков, коррозия на контактных поверхностях и снижение вибропрочности лопаток и дисков) [6].

Целью данной работы является выявление оптимальной технологии изготовления осевого моноколеса типа блиска с учетом технологических требований и условий эксплуатации газотурбинных двигателей.

В настоящее время моноколеса блисковой конструкции производятся соединением лопатки и диска [17], либо из цельной заготовки [6] в зависимости от конструкции и предъявляемых требований [1].

В первом случае изготавливаются отдельно диск колеса и лопатки [1], а затем их соединяют сваркой трения [17, 14] (рис. 1, а), или лазерной сваркой [6] (рис. 1, б), или другими видами сварки и пайки [2].

Данные технологии пригодны не только для изготовления новых моноколес, но также ремонта и геометрической модификации существующих [13, 17]. Однако из-за сварного соединения блиск имеет меньшую прочность по сравнению с блиском, полученным из монолитной заготовки [13], а также необходим контроль качества сварных соединений и геометрических параметров сварного узла [9].

В ЦИАМ разрабатывается технология изготовления методом гидростатического прессования, основанная на спекании лопаток с порошковым сплавом, образующим диск. При этом заранее изготовленные литые лопатки с помощью керамических закладных элементов упаковываются

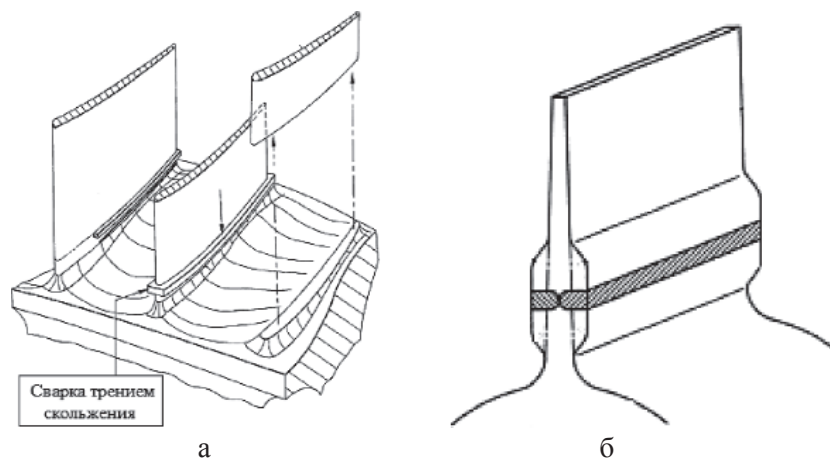


Рис. 1. Соединение лопаток

в капсулу, в которую затем засыпают гранулы порошкового сплава. После спекания капсула удаляется травлением, диск подвергается механической обработке [9].

Изготовление блисков из монолитной заготовки в связи с развитием технологий получило широкое распространение на производстве. Одной из самых производительных является электрохимическая обработка (ЭХО) металлов [15]. В процессе обработки заготовка присоединяется к аноду, а инструмент – к катоду источника постоянного либо импульсного тока.

Перенос заряда в зазоре между катодом и анодом происходит за счет потока электролита, чаще всего хлорида или нитрата натрия [16]. При этом происходит отделение ионов металла с поверхности заготовки. Форма инструмента (катода) задается в зависимости от технологических задач обработки (рис. 2). Электрохимическое снятие припуска гарантирует получение поверхностей высочайшего качества [15].

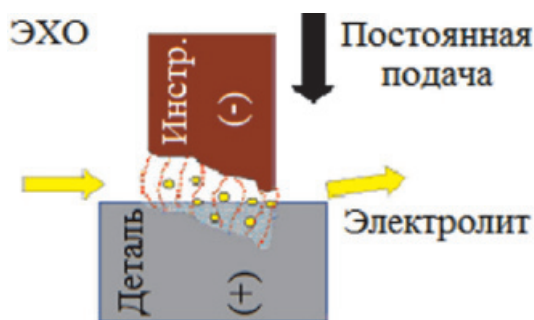


Рис. 2. Электрохимическая обработка

Трудоемкость ЭХО зависит от режимов обработки и материала изготавливаемой детали [15].

Существует способ обработки моноколес с помощью струйной резки под действием струи высокого давления, смешанной

с абразивом (гидроабразивная обработка) [1]. Форма струи имеет вид идеального точечного инструмента, что дает возможность обрабатывать изделия сложного профиля практически с любым радиусом закругления (минимальный радиус скругления будет равен радиусу струи) [1].

К основным преимуществам ГАО следует отнести: широкий диапазон обрабатываемых материалов и высокую скорость обработки (до 25 м/мин) при резке по контуру [1, 16].

Еще существует способ изготовления дисков с лопатками типа «блиск» с помощью штампа [11]. Нагретую заготовку устанавливают в изотермический штамп, содержащий обойму и керамические формообразующие элементы. Заготовку деформируют шародвижным пуансоном (рис. 3). При этом производят формирование лопаток выдавливанием материала заготовки в полости между формообразующими элементами. Готовый диск с лопатками удаляют из штампа путем разрушения керамических элементов.

Данный вид обработки обеспечивает изготовление моноколес с хорошими прочностными параметрами и имеет высокую производительность. Недостатками же является необходимость изготовления штампа и последующий его износ. Данную технологию используют при изготовлении небольших колес.

Самым распространенным способом изготовления моноколес из монолитной заготовки является фрезерование [6]. Это – традиционный производственный маршрут. В любом случае это самый быстрый путь для того, чтобы делать опытные образцы и испытательные аппаратные средства. Моноколеса из высокопрочных сталей и никелевых сплавов получать фрезерованием неэффективно вследствие низкой обрабатываемости этих материалов. Фрезерованием невозможно получить очень тонкие лопатки.

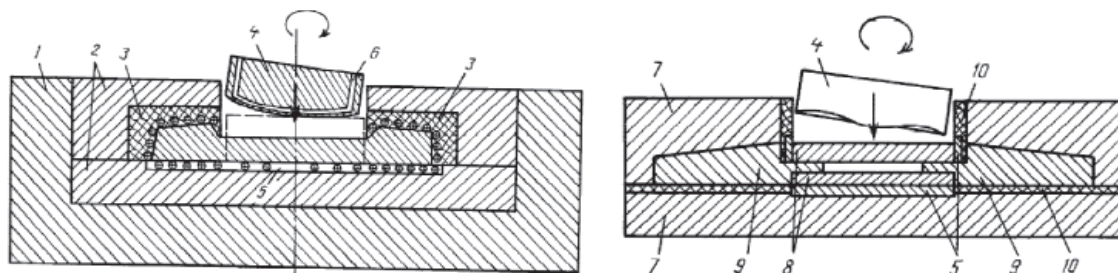


Рис. 3. Обработка моноколес штамповкой

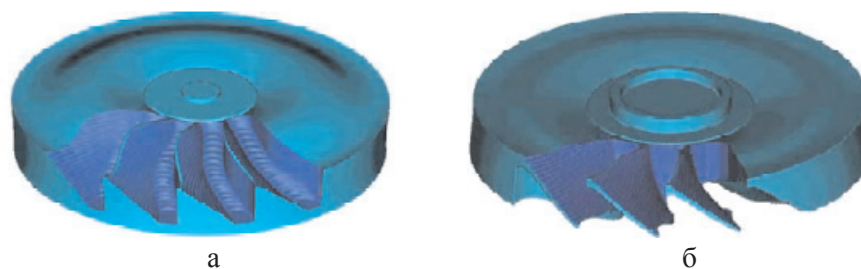


Рис. 4. Черновая обработка с одной (а) и с другой (б) стороны

В ПАО «МоторСич» (Украина) исследовалось высокоскоростное фрезерование моноколес. Технологический процесс изготовления моноколес состоит из черновой, получистовой и чистовой обработки [3]. Черновые операции выполняются на трехкоординатном станке. Получистовые и чистовые операции производились на пятикоординатном станке. Черновое фрезерование межлопаточного пространства осуществляется последовательно с двух сторон за две операции (рис. 4). После завершения цикла обработки одного межлопаточного пространства производился поворот делительного диска стола приспособления с заготовкой на шаг следующей лопатки, и цикл обработки повторялся снова.

Также стоит упомянуть, что есть технологии снятия межлопаточного припуска на черновой операции за один установ с использованием на пятикоординатном станке [6].

После операции прорезки межлопаточного пространства заготовку направляют на термостабилизацию. После термообработки моноколеса проходят получистовое и чистовое фрезерование на высокоскоростном фрезерном станке. Для придания лопатке необходимой дополнительной жесткости при чистовом фрезеровании межлопаточное пространство заполнялось специальной демпфирующей массой, которая выполняла еще и функции твердой СОЖ.

Данной технологией возможно изготовление осевых моноколес любых размеров и конфигурации. Фрезерование является оптимальной технологией [16] по критерию себестоимости на черновом этапе (рис. 5, а).

В работе [17] произведена оценка эффективности различных технологий по

критериям трудоемкости и себестоимости. Сравнительный анализ (рис. 5, б) показал, что изготовление моноколес путем ГАО на черновом этапе и ЭХО на чистовом этапе является самым эффективным. Однако по результатам оценки целесообразности внедрения ГАО для предварительной обработки межлопаточных каналов моноколес взамен существующей черновой обработки фрезерованием на предприятии ФГУП НПП газотурбостроения «САЛЮТ» технология ГАО в производстве является экономически нецелесообразной [1].

При черновой операции для снятия большого количества металла выгодно использовать крупногабаритные фрезы, но из-за конструкции моноколеса невозможно использовать большие концевые фрезы.

Существует инструмент для обработки зубчатых колес со сложной формой зубьев, имеющий равномерно расположенные режущие зубья по периметру кольцевой формы с торцевыми элементами и установленный с возможностью вращения вокруг своей оси [8, 12]. Кольцевой инструмент устанавливают в исходном положении. Далее инструмент начинает обработку межлопаточного канала моноколеса, при этом корыто лопатки обрабатывает внешняя режущая кромка, спинку лопатки – внутренняя, а дно межлопаточного канала – торцевая (рис. 6) [10]. После обработки одного межлопаточного канала осуществляют поворот моноколеса на $360^\circ/n$, где n – число лопаток моноколеса, и производят обработку следующего межлопаточного канала. Этот процесс более производительен, чем обработка концевыми фрезами [7].

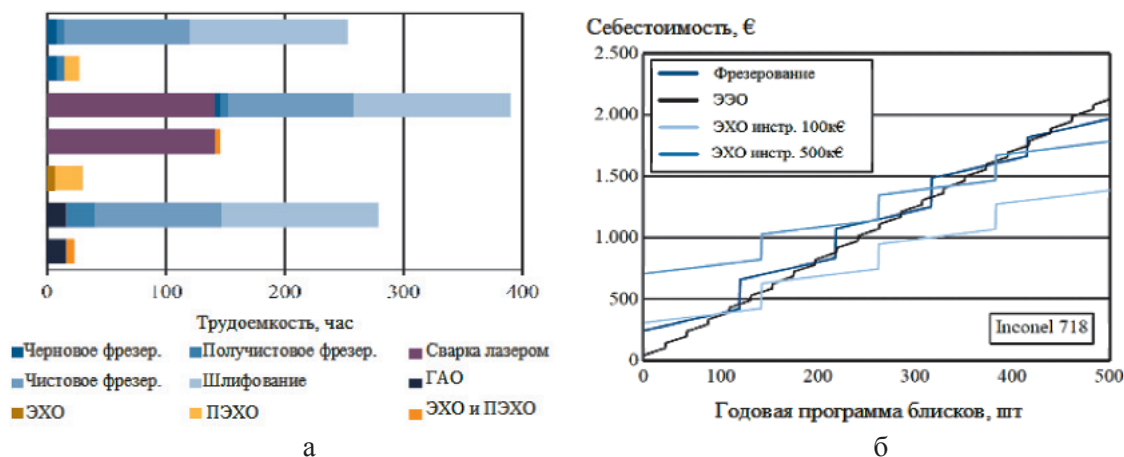


Рис. 5. Зависимости (а) себестоимости черновой обработки от годовой программы выпуска блисков, полученная в работе [16], и (б) трудоемкости от метода изготовления, полученная в работе [17]

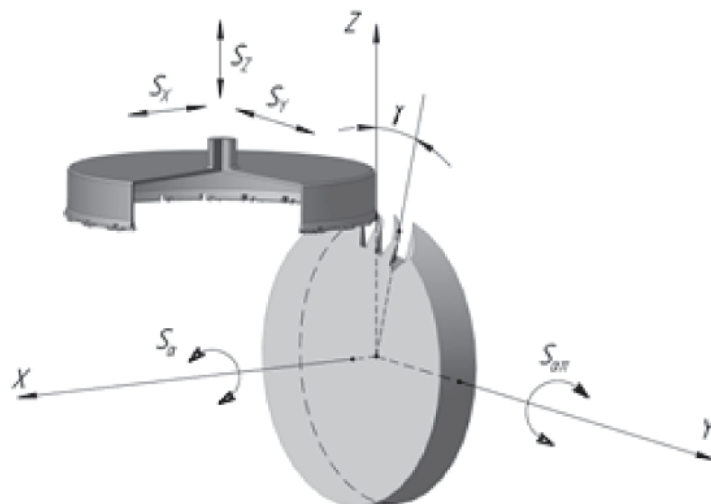


Рис. 6. Фрезерование моноколес кольцевым инструментом

Кольцевой инструмент позволяет обрабатывать межлопаточные каналы сложного профиля с большой закруткой пера, больших размеров и большой кривизной поперечных сечений лопаток моноколеса [10]. При этом, используя кольцевой инструмент, можно решить поставленную задачу с большей производительностью. Технический результат достигается тем, что инструмент выполнен в форме кольца с равномерно расположенными по периметру режущими элементами. Однако вследствие возникновения погрешности формообразования [8] обработку кольцевым инструментом можно производить только на черновом этапе.

Таким образом, с учетом вышесказанного можно утверждать, что нет единой оптимальной технологии изготовления и ремонта моноколес блисковой конструк-

ции, отвечающей всем требованиям и критериям. Так, например, при массовом изготовлении моноколес небольших размеров целесообразно использовать штамповки. Если же необходимо изготовление колес из разноименных сплавов, то тогда используются различные технологии соединения лопатки с диском.

Для крупных осевых моноколес газотурбинных двигателей фрезерование из монолитной заготовки является наилучшим решением, особенно на стадии чернового снятия материала. При этом использование кольцевого инструмента при формообразовании позволяет в значительной степени повысить производительность.

Использование лазерных технологий позволяет проводить ремонт поврежденных осевых моноколес, что увеличивает ресурс авиационных газотурбинных двигателей.

Список литературы

1. Багров С.В., Уваров Л.Б. Оптимизация технологических процессов изготовления осевых моноколес компрессоров газотурбинных двигателей // Полет. – 2009. – № 12. – С. 24–32.
2. Бычков В.М. Контроль качества при изготовлении блисков с применением линейной сварки трением // Вестник уфимского государственного авиационного технического университета. – 2012. – Т.16 № 7. – С. 95–101.
3. Гейкин В.А., Шаронова Н.И. Технология производства двигателей нового поколения // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – Т. 3, № 2 (45). – С. 11–13.
4. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А. Газотурбинные двигатели. – Пермь: Изд-во ОАО «Авиадвигатель», 2006. – Т. 2 – С. 365.
5. Качан А.Я. Технология обработки моноколес высокоскоростным фрезерованием // Вестник двигателестроения. – 2006. – № 1. – С. 106–117.
6. Крымов В.В., Елисеев Ю.С., Зудин К.И. Производство лопаток газотурбинных двигателей – М.: Машиностроение, 2003. – С. 376.
7. Лунев А.Н., Моисеева Л.Т., Туранов А.В. Оптимизация режимов фрезерования межлопаточных каналов блисков кольцевым инструментом // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2006. – № 3. – С. 60–63.
8. Лунев А.Н. Расчет кинематической погрешности при обработке кольцевым инструментом межлопаточного канала моноколес ГТД // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2007. – № 3. – С. 72–74.
9. Магеррамова Л.А. Применение биметаллических блисков, изготавливаемых методом ГИП из гранулируемых и литейных никелевых суперсплавов, для увеличения надежности и ресурса газовых турбин // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2011. – Т. 15 № 4. – С. 33–38.
10. Моисеева Л.Т. Моделирование процесса обработки межлопаточных каналов моноколес ГТД кольцевым инструментом. // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2005. – № 4. – С. 62–66.
11. Патент РФ № 2010144983/02, 20.05.12 / Кайбышев О.А. Способ изготовления дисков с лопатками типа «блиск» (варианты) и штамп для осуществления способа // Патент России № 2450883.2010 Бюл. № 1.
12. Печенкин М.В., Абзалов А.Р. Кинематика формообразования боковой поверхности зубьев гиперболической передачи концевым инструментом // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12–11. – С. 2310–2314.
13. Фомичев Е.О., Воронин Н.Н. Анализ существующих способов восстановления лопаток компрессора газотурбинного двигателя // Двигатель. – 2013. – № 5 (89). – С. 20–21.
14. Bhamji I. Solid state joining of metals by linear friction welding: a literature review // Materials Science and Technology. – 2011. – Т. 27, № 1. – С. 2–12.
15. Holding E. ECM – электрохимическая обработка // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 2 (62). – С. 6–12.
16. Klocke F. Technological and Economical Comparison of Roughing Strategies via Milling, EDM and ECM for Titanium- and Nickel-based Blisks // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2013. – Т. 6, № 3. – С. 198–203.

17. Klocke F., Technological and Economical Assessment of Alternative Process Chains for Blisk Manufacture Original Research Article // Procedia CIRP. – 2015. – Т. 35. – С. 67–72.

References

1. Bagrov S.V., Uvarov L.B. Optimizacija tehnologicheskikh processov izgotovlenija osevykh monokoles kompressorov gazoturbinykh dvigatelej // Polet. 2009. no. 12. pp. 24–32.
2. Bychkov V.M. Kontrol kachestva pri izgotovlenii bliskov s primeneniem linejnoy svarki treniem // Vestnik ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo tehniceskogo universiteta. 2012. T.16 no. 7. pp. 95–101.
3. Gejkin V.A., Sharonova N.I. Tehnologija proizvodstva dvigatelej novogo pokolenija // Vostochno-Evropejskij zhurnalпередовых технологий. 2010. T. 3, no. 2 (45). pp. 11–13.
4. Inozemcev A.A., Nihamkin M.A. Gazoturbinye dvigateli. Perm: Izd-vo ОАО «Авиадвигатель», 2006. T. 2 pp. 365.
5. Kachan A.Ja. Tehnologija obrabotki monokoljos vysokoskorostnym frezerovaniem // Vestnik dvigatelestroenija. 2006. no. 1. pp. 106–117.
6. Krymov V.V., Eliseev Ju.S., Zudin K.I. Proizvodstvo lopatok gazoturbinykh dvigatelej M.: Mashinostroenie, 2003. pp. 376.
7. Lunev A.N., Moiseeva L.T., Turanov A.V. Optimizacija rezhimov frezerovaniya mezhlopatocnykh kanalov bliskov kolcevym instrumentom // Izvestija vysshix uchebnykh zavedenij. Aviacionnaja tehnika. 2006. no. 3. pp. 60–63.
8. Lunev A.N. Raschet kinematicheskoy pogreshnosti pri obrabotke kolcevym instrumentom mezhlopatocnogo kanala monokoles GTD // Izvestija vysshix uchebnykh zavedenij. Aviacionnaja tehnika. 2007. no. 3. pp. 72–74.
9. Magerramova L.A. Primenenie bimetallicheskih bliskov, izgotavlivaemykh metodom GIP iz granuliruemykh i litejnykh nikelyevykh supersplavov, dlja uvelichenija nadezhnosti i resursa gazovykh turbin // Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo tehniceskogo universiteta. 2011. T. 15 no. 4. pp. 33–38.
10. Moiseeva L.T. Modelirovanie processa obrabotki mezhlopatocnykh kanalov monokoles GTD kolcevym instrumentom. // Izvestija vysshix uchebnykh zavedenij. Aviacionnaja tehnika. 2005. no. 4. pp. 62–66.
11. Patent RF no.2010144983/02, 20.05.12 / Kajbyshv O.A. Sposob izgotovlenija diskov s lopatkami tipa «blisk» (varianty) i shtamp dlja osushhestvlenija sposoba // Patent Rossii no. 2450883.2010 Bjul. no. 1.
12. Pechenkin M.V., Abzalov A.R. Kinematika formoobrazovaniya bokovoy poverhnosti zubev giperboloidnoj peredachi koncevym instrumentom // Fundamentalnye issledovaniya. 2014. no. 12–11. pp. 2310–2314.
13. Fomichev E.O., Voronin N.N. Analiz sushhestvujushih sposobov vosstanovlenija lopatok kompressora gazoturbinykh dvigatelej // Dvigatel. 2013. no. 5 (89). pp. 20–21.
14. Bhamji I. Solid state joining of metals by linear friction welding: a literature review // Materials Science and Technology. 2011. T. 27, no. 1. pp. 2–12.
15. Holding E. ECM jelectrohimicheskaja obrabotka // Vostochno-Evropejskij zhurnal передовых технологий. 2013. no. 2 (62). pp. 6–12.
16. Klocke F. Technological and Economical Comparison of Roughing Strategies via Milling, EDM and ECM for Titanium- and Nickel-based Blisks // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2013. T. 6, no. 3. pp. 198–203.
17. Klocke F., Technological and Economical Assessment of Alternative Process Chains for Blisk Manufacture Original Research Article // Procedia CIRP. 2015. T. 35. pp. 67–72.