

УДК 621.961.2

DOI:10.30987/2223-4608-2021-2-20-26

Г.В. Панфилов, д.т.н., Нгуен Ван Тинь, аспирант
(Тульский государственный университет, 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92)
E-mail: tulpan.2000@ya.ru

Штамповая оснастка и инструмент для изготовления трехслойных плоских кольцевых деталей с композитными материалами

Приведены результаты проектирования штамповой оснастки и специального инструмента для изготовления разделительными операциями штамповки трехслойных плоских кольцевых деталей со средним несущим металлическим слоем и периферийными упругими слоями увеличенной толщины из композитных материалов. Экспериментально отработаны рациональные геометрические размеры и форма инструмента, обеспечивающие качественное изготовление указанных деталей и расширение технологических возможностей разделительных операций для их изготовления, в частности, для конструктивных вариантов с увеличенной толщиной периферийных упругих слоев из композитных материалов.

Ключевые слова: интеркалированный пенографит; удаление сдвигом наружного и внутреннего отходов; трехслойные плоские кольцевые детали; ступень с заостренной кольцевой режущей кромкой на рабочих торцах инструмента.

G.V. Panfilov, Dr. Sc. Tech., Nguyen Van Tinh, Post graduate student
(Tula State University, 92, Lenin Avenue, Tula, 300012)

Die equipment and tool for manufacturing sandwich flat ring parts with composites

The results of designing die equipment and special tool through separate die operations for manufacturing sandwich flat ring parts with the middle base metal layer and periphery elastic layers with increased composite thickness are shown. Efficient geometrical dimensions and a tool shape ensuring qualitative manufacturing parts mentioned and extension of technological potentialities of separating operations for their manufacturing, in particular, for design options with the increased thickness of periphery elastic composite layers are optimized experimentally.

Keywords: intercalated foamed graphite; internal and external waste removal by shift; sandwich flat ring parts; stage with sharpened ring cutting edge on tool.

Трехслойные плоские кольцевые детали со средним несущим силовым металлическим слоем и утолщенными периферийными упругими слоями из различных материалов (полиуретан, фторопласт, паронит, углепластики), повышающими надежность функционирования указанных изделий, находят широкое применение в различных отраслях промышленности, где механизмы, устройства, трубопроводные системы и сооружения работают при весьма высоких температурах и с химически агрессивными средами. Особое место в выборе материала периферийных слоев принадлежит композитным материалам и, в частности, интеркалированному спрессованному пенографиту, обладающему уникальными свойствами [1 – 3].

Известны способы навивки слоев определенной толщины из узкой ленты неармиро-

ванного упругого композитного материала с последующим креплением (в частности, наклеиванием данных слоев на средний металлический, несущий нагрузку, слой) и другие, существенно усложняющие технологический процесс изготовления и негативно сказывающиеся на качестве изготавливаемой продукции.

Сложность применения типовых разделительных операций штамповки (при изготовлении трехслойных плоских кольцевых деталей данного типа) обусловлена проблематичностью обеспечения предварительного жесткого зажима между ступенями инструмента (матрицы, пуансона, прижима) с заостренными режущими кромками на рабочих торцах среднего силового металлического слоя перед реализацией соответствующей операции. Особую сложность представляет обоснование конст-

тактных сжимающих напряжений на границах слоев и препятствует нарушению сцепления между ними в наиболее важной для функционирования изготавливаемых деталей периферийной зоне, примыкающей непосредственно к периметру разделительной операции сдвигом. Также создаваемые сжимающие напряжения исключают возможность изгиба среднего металлического слоя, уменьшающего качество получаемой детали.

Толщина стенок полости пуансона назначается в зависимости от толщины и материала среднего металлического слоя 5 и материала самого пуансона. Она должна обеспечивать требуемую стойкость пуансона и колеблется в диапазоне $1,3S_M \leq t_{c.n.} \leq 2,9S_M$. Из рис. 1 следует, что ее необходимо выполнять, по возможности, минимальной, поскольку это обеспечивает качество изготавливаемых деталей.

Наносимая на торец пуансона фаска с интервалом углов $6^\circ \leq \delta_1 \leq 16^\circ$, создает менее дефектное поджатие верхнего упругого слоя 4 в радиальном направлении и более качественную торцевую поверхность изготавливаемой трехслойной детали.

3. Матрица 8 имеет высоту $h_{к.в.}$ ступени с заостренной режущей кромкой 7 у верхнего торца, составляющую $0,68S_{н.с.} \leq h_{к.в.} \leq 0,83S_{н.с.}$ от толщины нижнего упругого слоя из композитного материала. Как и для прочих конструктивных элементов, ее обоснованное фиксированное значение устанавливается в зависимости от свойств материала самой матрицы и нижнего упругого слоя 6 изготавливаемой детали. Это способствует минимизации искажения формы части заготовки, идущей в отход. При вырубке промежуточного полуфабриката из листового, полосового или ленточного материала обеспечивается возможность назначения перемычек меньшей ширины, а при многономенклатурном производстве, когда отходы пробивки используют в качестве заготовок для изготовления аналогичных деталей меньшего наружного диаметра, уменьшается величина отхода, идущего в облой, после операции обрезки по внешнему контуру.

Толщина стенок $t_{к.в.}$ ступени с заостренной режущей кромкой на торцевой части матрицы должна обеспечивать ее необходимую прочность и стойкость этой ступени. При этом конкретный размер устанавливается из диапазона $1,6S_M \leq t_{к.в.} \leq 3,4S_M$. Угол внешней фаски, выполненной на торцевой части данной ступени, выбирается из диапазона $12^\circ \leq \delta_2 \leq 24^\circ$, как и для аналогичной фаски на прижиме. Сочетание конкретных размеров $t_{к.в.}$ и δ_2 долж-

но обеспечивать минимальную толщину опорной площадки ступени с заостренной режущей кромкой 7, соответствующую отношению, требуемому для удовлетворительной стойкости этой режущей кромки.

Спроектированный инструментальный пакет работает следующим образом. Предварительно пуансон 2 внедряется в верхний упругий слой 3 до касания со средним несущим металлическим слоем 5. При этом вся заготовка (листовая, мерная) опускается вниз, и кольцевая ступень с заостренной режущей кромкой 7 на торцевой части матрицы 8 одновременно прорезает нижний упругий слой 6 также до касания снизу среднего металлического слоя. За счет обоснованной глубины глухой цилиндрической полости в пуансоне, верхний периферийный слой 4 изготавливаемой детали дозированно упруго сжимается, способствуя повышению ее качества. Последующим перемещением кольцевого прижима 1 жестко прижимают заготовку по среднему металлическому слою 5 к матрице 8. Далее окончательно осуществляют операцию отделения наружного отхода сдвигом соответствующими ступенями с заостренными режущими кромками.

Применение разработанной штамповой оснастки и инструмента позволяет расширить технологические возможности изготовления полуфабрикатов с требуемым наружным диаметром рассматриваемых трехслойных плоских кольцевых деталей до параметра $\kappa_B = (S_{в.с.} = S_{н.с.}) / S_M \leq 6,3$. Тогда при толщине среднего металлического слоя $S_M \leq 3,1$ мм соответствующий диапазон увеличенных периферийных упругих слоев будет соответствовать пределам $S_{в.с.} = S_{н.с.} \leq 19,53$ мм.

Проведены проверочные экспериментальные исследования по оценке обоснованности установленных рациональных геометрических размеров и их соотношений для инструмента, заготовок и деталей, изготавливаемых с использованием разработанной оснастки. Полученные результаты подтвердили правильность структурной компоновки разработанного инструментального пакета и адекватность найденных геометрических размеров и их соотношений.

Установлено, что при вырубке трехслойных плоских кольцевых деталей со средним силовым несущим слоем из нержавеющей стали 08X18H10, имеющих наружный диаметр $D = 85$ мм, толщину среднего металлического слоя $S_M = 1,2$ мм, толщину периферийных упругих слоев из интеркалированного пе-

нографита $S_{в.с.} = S_{н.с.} = 4,5$ мм, наиболее рациональным являлся инструмент со следующими геометрическими размерами. Глубина глухой цилиндрической полости в пуансоне – $h_n = 3,5$ мм; толщина стенок полости пуансона $t_{с.п.} = 1,85$ мм; фаска у его рабочего торца нанесена под углом $\delta_1 = 12^\circ$; толщина опорной площадки на ступени с режущей заостренной кромкой соответствовала предельному неравенству $t_p \geq 0,33$ мм; толщина стенок кольцевого прижима – $t_n = 2,1$ мм; угол фаски на кольцевом прижиме – $\delta_2 = 16^\circ$; толщина опорной площадки (см. рис. 1) ступени с режущей кромкой прижима – $t_o = 0,65$ мм; высота ступени с заостренной режущей кромкой на матрице – $h_{к.в.} = 3,4$ мм; толщина стенок указанной $t_{к.в.} = 2,2$ мм; угол фаски – $\delta_2 = 16^\circ$; толщина опорной площадки режущей кромки – $t_o = 0,65$ мм.

Разработанная конструкция штамповой оснастки и инструмента с указанными геометрическими размерами обеспечила изготовление трехслойных плоских кольцевых деталей, содержащих средний металлический слой и утолщенные (относительно него) периферийные слои из интеркалированного пенографита требуемого качества.

Разделительные операции с удалением внутреннего отхода (пробивка отверстий, проточка в штампе). Изготовление круглых плоских кольцевых деталей из листовых трехслойных материалов со средним металлическим слоем и периферийными упругими слоями из композитных материалов с применением операций, отделяющих внутренний отход, также весьма проблематично. Это обусловлено сложностью обеспечения предварительного жесткого прижима среднего металлического слоя перед его окончательным разделением сдвигом, отсутствие которого неизбежно приводит к изгибу металла в зоне среза и разрушению периферийных упругих слоев, что недопустимо.

Указанные проблемы приобретают большую значимость при увеличении толщины периферийных слоев из композитных материалов, что требует совершенствования известных способов [7], технологической оснастки и рабочего инструмента, потребных для изготовления таких деталей высокого качества.

Разработана конструкция штамповой оснастки и инструмента для удаления отхода при получении отверстий и внутренних замкнутых контуров в листовых трехслойных заготовках со средним металлическим слоем и утолщен-

ными периферийными упругими слоями из композитных материалов. В основу предлагаемых конструктивных решений, как и в аналогичных разделительных операциях с удалением наружного отхода, положен принцип формирования неизбежных дефектов, по возможности, в удаляемом отходе. Трехслойная заготовка (рис. 2) имеет: участок верхнего упругого слоя 4, остающийся в детали; часть этого слоя 5, удаляемого в отход; средний металлический слой 6; участок нижнего упругого слоя 7, также удаляемого при выполнении данной операции.

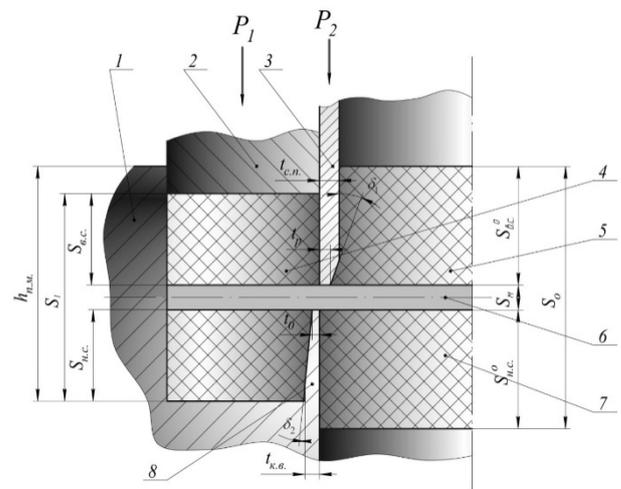


Рис. 2. Схема разработанного способа пробивки отверстий в листовых многослойных заготовках с центральным металлическим слоем и утолщенными наружными эластичными слоями

Исследуемая разделительная операция предусматривает последовательную реализацию следующих этапов: установку предварительно изготовленной по внешнему периметру (диаметру) мерной заготовки (полуфабриката) толщиной S_0 в полость глубиной $h_{н.м.}$ матрицы 1; дозированное сжатие силой P_1 заготовки кольцевым прижимом 2; прорезку периферийных упругих слоев заостренными режущими кромками кольцевого пуансоном 3 и матрицы 7; окончательное отделение сдвигом участков среднего силового металлического слоя 6 изготавливаемой детали от отхода последующим перемещением пуансона, воздействующим силой P_2 .

Спроектированный инструментальный пакет содержит следующие основные детали:

1. Матрица 1 имеет полость, в которую устанавливается мерная заготовка. Наличие указанной полости способствует ограничению радиальных упругих и пластических деформаций заготовки, как во время ее предвари-

тельного прижима дозированной силой, так и непосредственно при выполнении данной разделительной операции.

Ступень с заостренной режущей кромкой 8 на матрице имеет цилиндрический участок толщиной стенки $1,0...3,5 S_M$. Высота этого цилиндрического участка согласовывается с рационально допустимой степенью упругого сжатия нижнего слоя, изготовленного из конкретного композитного материала. Это позволяет существенно уменьшить толщину указанной ступени по сравнению с известным конструктивным вариантом [7], когда ее выполняют только с клиновым профилем. Это особенно важно при изготовлении плоских кольцевых деталей со средним несущим металлическим слоем и периферийными упругими слоями увеличенной (относительно среднего слоя) толщины. На торцевую часть данной ступени наносится внешняя фаска с углом $6^\circ \leq \delta_2 \leq 16^\circ$, образующая заостренную режущую кромку с опорной кольцевой площадкой толщиной не менее $t_0 = 0,42S_M$.

В донной части полости матрицы предусмотрено отверстие, имеющее две ступени. Одна из них, примыкающая к опорной площадке ступени с заостренной режущей кромкой, является калибровочной. Ее диаметр рассчитывается в соответствии с методиками определения исполнительных размеров инструмента для соответствующей разделительной операции, реализуемой в штампах. Ниже от зоны обработки имеется вторая ступень несколько большего диаметра, снижающая уровень образования дефектов в композитных слоях и облегчающая удаление внутреннего отхода на провал.

2. Кольцевой прижим 2 контактирует с наружной поверхностью верхнего периферийного упругого слоя только на участке заготовки, остающемся впоследствии в изготавливаемой детали. Он имеет независимый привод, позволяющий перед реализацией разделительной операции упруго сжимать с требуемой степенью трехслойную заготовку (полуфабрикат) регулированием строго фиксированного по величине перемещения этого прижима, либо регулируемым силовым воздействием (например, с помощью пружинных конструктивных элементов).

3. Кольцевой пуансон 3 имеет диапазон изменения толщины стенки, назначаемой в интервале $1,05S_M \leq t_{c.п.} \leq 3,52S_M$ в зависимости от прочности и толщины материала среднего металлического слоя б. На рабочий торец указанного пуансона нанесена внутренняя фаска

с углом $12^\circ \leq \delta_1 \leq 24^\circ$, образующая ступень с заостренной режущей кромкой, при этом толщина основания рабочей торцевой площадки режущей кромки пуансона 3 должна быть не менее $t_p = 0,72S_M$.

В разработанной конструкции устройства заключительный этап отделения внутреннего отхода от заготовки (предварительно изготовленного полуфабриката с требуемыми наружными размерами) осуществляется относительным сдвигом участков среднего металлического слоя без сжатия наружных упругих слоев указанного отхода.

Последовательность реализации данной операции осуществляется следующим образом. Вначале силой P_1 на заготовку 4, размещенную в полости матрицы 1 и опирающуюся наружной поверхностью нижнего упругого слоя на опорную торцевую площадку ступени 8 с заостренной режущей кромкой матрицы, воздействует кольцевой прижим 2, перемещая ее до упора в основание этой полости и, далее, дозированной упруго сжимая эту заготовку. Одновременно происходит прорезка нижнего упругого слоя 7 ступенью с режущей кромкой 8 матрицы 1.

При движении прижима верхний и нижний упругие слои первоначальной толщиной соответственно $S_{в.с.}^0$ и $S_{н.с.}^0$ (см. рис. 2) сжимаются до момента касания нижней поверхностью среднего металлического слоя б опорной кольцевой площадки толщиной t_0 ступени 8 с заостренной кромкой на матрице. На этом сжатие и прорезка нижнего упругого слоя завершаются, его толщина становится равной величине $S_{н.с.}$ и общей высоте ступени 8 на матрице.

Последующее дозированное перемещение прижима приводит к дополнительному сжатию верхнего упругого слоя до толщины $S_{в.с.}$, что обеспечивает требуемую силу прижима заготовки. Это дает возможность корректировки различного по величине сжатия верхнего и нижнего периферийных упругих слоев, что способствует сохранению качества среднего металлического слоя б и всей изготавливаемой многослойной детали. Здесь под качеством среднего металлического слоя в детали следует понимать устойчивость к нарушению формы (общих отклонений от плоскостности и локальных изгибов в зоне обработки). Далее, под действием силы P_2 кольцевой пуансон 3 прорезает верхний наружный эластичный слой 5 и осуществляет окончательное отделение внутреннего отхода относительным сдвигом соответствующих участков металли-

ческого слоя. Исключение сжатия наружных эластичных слоев части заготовки, идущей в отход после пробивки, повышает качество торцевой поверхности изготавливаемой детали. Также упрощается извлечение отхода из полости кольцевого пуансона без образования дополнительных дефектов.

Предлагаемый способ апробирован на изготовлении трехслойных прокладочных, уплотнительных и прочих кольцевых деталей различного назначения в следующем диапазоне размеров: наружный диаметр детали – $40 \leq D \leq 135$ мм; толщина металлического слоя – $0,4 \leq S_m \leq 3,5$ мм; толщина наружных эластичных слоев – $5,15 \leq S_{в.с.} = S_{н.с.} \leq 20,6$ мм.

Проверочные экспериментальные исследования и изготовление опытных партий разделительными операциями с удалением внутреннего отхода и уточнением рациональных геометрических размеров инструмента были проведены для двух типоразмеров трехслойных плоских кольцевых деталей из рассматриваемого комплекса его геометрических размеров.

1. Детали, имеющие: толщину среднего металлического слоя 0,52 мм из нержавеющей стали 30ХГСА; толщину периферийных упругих слоев из интеркалированного пенографита, в допустимой степени восстанавливающего свою форму после приложения технологической силы, вызывающей упругие сжимающие деформации до 30 %, равную 5,0 мм; наружный диаметр – 55 мм. Это соответствует оценочному параметру $k_{п} = (S_{в.с.} + S_{н.с.}) / S_m = 9,62$. Рациональными оказались следующие размеры инструмента. Толщина стенки кольцевого пуансона – 2,4 мм, на рабочий торец которого наносилась внутренняя фаска под углом 20° таким образом, что толщина рабочей площадки составляла $t_p = 0,49$ мм. Размеры матрицы: толщина стенки цилиндрического участка ступени с заостренной режущей кромкой – 1,8 мм, на рабочий торец которого наносится внешняя фаска под углом 10° таким образом, чтобы толщина кольцевой опорной площадки составила $t_0 = 0,32$ мм.

2. Детали, имеющие: толщину среднего металлического слоя 3,5 мм из нержавеющей стали 30ХГСА; толщину периферийных упругих слоев из интеркалированного пенографита, равную 22 мм. Оценочный параметр соотношения толщины периферийных упругих и среднего металлического слоя составил $k_{п} = 6,29$. Наружный диаметр детали – 115 мм. При этом рациональными оказались следующие размеры инструмента: толщина стенки

кольцевого пуансона – 3,9 мм, на рабочий торец которого наносилась внутренняя фаска под углом 14° таким образом, что толщина рабочей опорной площадки составляла $t_p = 3,15$ мм. Размеры матрицы: толщина стенки цилиндрического участка кольцевого выступа – 4,1 мм, на рабочий торец которого наносится внешняя фаска под углом 14° таким образом, чтобы толщина стенки кольцевой опорной площадки составила $t_0 = 2,15$ мм.

Заключение

В результате комплекса проведенных исследований установлено следующее:

1. Разработана штамповая оснастка и специальный инструмент, позволяющие существенно расширить технологические возможности применения разделительных операций штамповки для изготовления качественных трехслойных уплотнительных, прокладочных и прочих плоских кольцевых деталей из материала со средним силовым металлическим слоем и периферийными упругими слоями из композитных материалов.

2. Оценочный параметр соотношения толщины слоев, удовлетворяющего требованиям по качеству изготавливаемой детали и стойкости инструмента, удалось улучшить за счет возможности относительного увеличения толщины периферийных упругих слоев из интеркалированного пенографита. При удалении наружного отхода (вырубка, высечка, обрезка, отрезка) – с $k_{в} \leq 1,5$ по известному способу [6] до $k_{в} \leq 6,3$, когда эти операции выполняются с использованием разработанной штамповой оснастки и инструмента. При удалении внутреннего отхода (пробивка, просечка) – с $k_{п} \leq 4,5$ [7] до $k_{п} \leq 12,9$.

3. Минимизация дефектов и искажений не только в изготавливаемой детали, но и в материале отхода весьма важно, особенно при многономенклатурном производстве указанных деталей, поскольку часто внутренний отход изготавливаемой детали большого диаметра является заготовкой для изготовления аналогичной трехслойной детали меньшего диаметра. При вырубке из листового материала это позволит назначать перемычки между деталями меньшей ширины, а при обрезке по наружному контуру мерной заготовки, как отхода пробивки, появившегося в результате изготовления другой аналогичной детали больших габаритов, ширина отрезаемого облоя будет меньше.

4. В результате статистической обработки

результатов экспериментальных данных установлено, что, как и при использовании других способов и штампуемых устройств, основными контролируемыми дефектами изготавливаемых трехслойных деталей данного типа, которые следует минимизировать, являются:

- изгиб центрального металлического слоя в зоне среза в направлении перемещения пуансона, разрушающий в этой зоне периферийные упругие слои и искажающий форму плоской детали в целом;

- нарушение перпендикулярности между наружными плоскостями периферийных упругих слоев и торцевой цилиндрической поверхностью детали;

- недопустимое смятие периферийных упругих слоев из композитных материалов вследствие необоснованного назначения режимов (перемещения или прикладываемой силы) функционирования прижима.

5. Конструкция разработанной штамповой оснастки и обоснованно назначенные размеры и форма специального инструмента позволяют с удовлетворительной стойкостью его ступеней с заостренными режущими кромками изготавливать разделительными операциями плоские кольцевые детали исследуемого в данной работе типа с относительно малыми отклонениями качественных параметров, которые удовлетворяют техническим условиям на их производство.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ТУ 5728 – 004 – 12058737 – 2002. Материал прокладочный графитовый армированный (АГПМ). Пермь: ЗАО «НОВОМЕТ – ПЕРМЬ», 2003. – 34 с.

2. Технический стандарт США ASTM F – 36 – 15. Стандартный метод испытаний на сжимаемость и восстановление материалов и прокладок. // Адаптировано для РФ подкомитетом F03.20 по методам механических испытаний. Кн. стандартов. Т. 09.02. С. 143 – 198.

3. Каравасев, Д.М., Ханов, А.М., Дегтярев, А.И. Механические свойства композиционного материала на основе терморасширенного графита. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14, №1 (2). С. 562 – 564.

4. ТУ 5728-016-50187417. Прокладки фланцевые неармированные из графитового материала «ГРАФЛЕКС».

Технические условия. Изд-во: Климовск: ЗАО «УНИХИМТЕК-ГРАФЛЕКС». – 2011. – 23 с.

5. ТУ 5728-006-93978201. Прокладки уплотнительные из терморасширенного графита (ПУТГ). Изд-во: Пермь: ООО «Силур». – 2008. – 48 с.

6. Патент 2483823 РФ. Способ вырубki деталей из листовых многослойных материалов с центральным металлическим слоем и наружными эластичными слоями. // Г.В. Панфилов, П.В. Судаков, К.В. Власов. Опубл. 10.06.2013 Бюл. №16.

7. Патент 2483824 РФ. Способ вырубki деталей из листовых многослойных материалов с центральным металлическим слоем и наружными эластичными слоями. // Г.В. Панфилов, П.В. Судаков, К.В. Власов. Опубл. 10.06.2013 Бюл. №16.

REFERENCES

1. TS 5728 – 004 – 12058737 – 2002. *Packing Graphite Reinforced Material (PGRM)*. Perm: CC “NOVOMET – PERM”, 2003. – pp. 34.

2. Technical Standard of the USA ASTM F – 36 -15. *Common Method of Compression, Material and Insert Restoration Tests*. // Adapted to the RF by Subcommittee F03.20 on methods for mechanical tests. Standards Book, Vol. 09.02. pp. 143 – 198.

3. Karavaev, D.M., Khanov, A.M., Degtyaryov, A.I. Mechanical properties of composite based on thermo-extended graphite. // *Proceedings of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. – 2012. – Vol. 14, No.1 (2). pp. 562 - 564.

4. TS 5728-016-50187417. *Non-reinforced Flange Fillings Made of “GRAFLEX” Material. Technical Specifications*. Publishing House: Klimovsk: CC “UNICHIMTECHGRAPHLEX”. – 2011. – pp. 23.

5. TS 5728-006-93978201. *Seal Thermo-extended Graphite Fillings*. Publishing house: Perm: PC “SILUR”. – 2008. – pp. 48.

6. Pat. 2483823 the RF. *Method for Cutting Parts from Sheet Multi-layer Material with Central Metal Layer and External Elastic Layers*.// G.V. Panfilov, P.V. Sudakov, K.V. Vlasov. Published: 10.06.2013, Bull. No.16.

7. Pat. 2483824 the RF. *Method of Cutting Parts from Sheet Multi-layer Materials with Central Metal Layer and External Elastic Layers*. // G.V. Panfilov, P.V. Sudakov, R.V. Vlasov. Published: 10.06.2013. Bull. No.16.

Рецензент д.т.н.
Александр Николаевич Прокофьев