УДК 621.9.014.8

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СИЛОВЫХ ГИДРОЦИЛИНДРОВ МЕХАНИЗИРОВАННЫХ КРЕПЕЙ НА ОСНОВЕ ВИБРОУСТОЙЧИВОЙ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

В.В.МАКСАРОВ, *д-р техн. наук, профессор, maks78.54@mail.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия
Ю.ОЛЬТ, *д-р техн. наук, профессор, jyri.olt@emu.ee*
Эстонский университет естественных наук, Тарту, Эстония

В статье предлагается новая виброустойчивая система демпфирующего инструмента, эффект в которой достигается сочетанием принципа многослойности с использованием анизотропных свойств проката. Эксплуатация такой системы инструмента на операциях точения позволяет снижать высокочастотные колебания, возникающие в процессе резания, за счет упорядоченной разориентации текстуры анизотропных пластин сборной многослойной державки, позволяющей эффективно рассеивать энергию колебательной волны на границе перехода между пластинами державки. Метод дает возможность существенно повысить стойкость режущей кромки инструмента и расширить технологические возможности выбора эффективных режимов резания, обеспечивающих выполнение требований по размерной и геометрической точности, качеству обрабатываемых поверхностей механизированных крепей гидравлических агрегатов горных машин и оборудования.

***Ключевые слова*:** режущий инструмент, виброустойчивый инструмент, инструмент для внешней обработки, инструмент для расточки, коэффициент поглощения, структура материала державки.

Одним из наименее надежных гидравлических агрегатов механизированных крепей является силовой гидроцилиндр рабочего оборудования, на него приходится около 40 % отказов. Установлено, что около 70 % отказов гидроцилиндров происходит по причине выхода из строя уплотнителей, 24 % – изгиба штоков, 45 % – образования задиров на рабочих поверхностях штоков и гильз, 1,5 % – обрыва поршней и проушин. Анализ характера отказов гидроцилиндров показал, что на герметизирующую способность уплотнителей решающее влияние оказывают повреждения поверхностей штоков и гильз в виде абразивных рисок и износ центрирующих деталей – поршней и направляющих втулок.

Для повышения долговечности и надежности работы гидроцилиндров механизированных крепей, особенно в условиях высокой динамической нагруженности, требуется высокая точность изготовления трущихся пар (IT6), при этом для штока шероховатость поверхности не менее 0,20 мкм и для цилиндра 0,32 мкм.

Возникновение вибраций в системе «станок – приспособление – инструмент – деталь» напрямую зависит от многих факторов: жесткости и демпфирующей способности элементов системы; прочности и пластичности обрабатываемого материала; вида обработки; режимов резания и т.д. Любое случайное возмущение в технологической системе, вызванное врезанием или отталкиванием режущего инструмента, неравномерностью припуска, неоднородностью обрабатываемого материала, биением заготовки или инструмента, приводит к неизбежному возникновению собственных затухающих колебаний, которые ухудшают точность и шероховатость поверхности.

Колебания упругой системы сопровождаются изменением площади сечения среза и скорости резания, что приводит к изменению силы резания и ее составляющих. В случае, если изменение силы резания отстает во времени относительно изменения толщины среза

или с повышением скорости уменьшается радиальная составляющая силы резания, то собственные затухающие колебания могут перейти в незатухающие автоколебания, где энергию, необходимую для поддержания колебаний, создает сама переменная сила резания [13].

Вибрации, возникающие в процессе механической обработки, существенно затрудняют эксплуатацию технологического оборудования, работающего в автоматизированном цикле, являются причиной преждевременного износа инструмента, аварий станков и приспособлений. Динамическая устойчивость технологической системы и снижение уровня вибраций, возникающих в процессе резания, являются залогом стабильности стружкообразования, что особенно важно при автоматизации технологического процесса [13]. Таким образом, задача обеспечения устойчивости технологической системы за счет снижения уровня автоколебаний является одной из важнейших в области лезвийной обработки, особенно при чистовой обработке изделий на автоматических станках и станках с числовым программным управлением [5, 10-12, 14].

Изучению автоколебаний при резании металлов с целью понять природу процессов стружкообразования при точении и оценить важность обеспечения устойчивости технологической системы при механической обработке посвящен ряд фундаментальных исследований. Анализ и классификация методов и способов обеспечения динамической стабильности технологической системы позволяют утверждать, что в той или иной степени применение всех этих методов повышает устойчивость технологической системы, разработанные на их основе способы успешно находят практическое применение при механической обработке. Однако в настоящее время не существует универсального метода, позволяющего эффективно бороться с вибрациями, возникающими при точении.

При чистовой токарной обработке наиболее уязвимой с точки зрения динамической стабильности является подсистема «инструмент». На технологическую систему воздействует внешняя периодическая сила, вызывающая колебательный процесс с частотой, равной частоте возмущающей силы, или сложные периодические процессы, обусловленные нелинейными свойствами системы, вследствие этого возникают собственные затухающие и вынужденные колебания, параметрические возбуждаемые колебания и автоколебания системы. Интенсивность вынужденных колебаний особенно велика в условиях резонансных режимов, которые недопустимы в качестве рабочих режимов при чистовой обработке на металлорежущих станках.

Одним из наиболее эффективных способов, позволяющих обеспечивать устойчивость парциальной технологической подсистемы «инструмент» при чистовой обработке тел вращения, является создание системы демпфирующего инструмента, эффект в которой достигается сочетанием принципа многослойности с использованием анизотропных свойства проката. Эксплуатация такой системы инструмента на операциях точения позволяет снижать высокочастотные колебания, возникающие в процессе резания, за счет упорядоченной разориентации текстуры анизотропных пластин сборной многослойной державки, позволяющей эффективно рассеивать энергию колебательной волны на границе перехода между пластинами державки. Этот метод дает возможность существенно повысить стойкость режущей кромки инструмента и расширить технологические возможности выбора эффективных режимов резания, обеспечивающих выполнение требований по размерной и геометрической точности, качеству обрабатываемой поверхности [2, 7].

Метод создания системы демпфирующего инструмента основан на принципе многослойности, предполагает использование анизотропии свойств пластин державки, создающейся в результате обработки давлением. Пластическая деформация сталей горячей прокаткой приводит к изменению направления волокон макроструктуры, структурных составляющих и включений вдоль ее направления, наряду с кристаллографической текстурой образуется механическая текстура деформации. Державку режущего инструмента предлагается изготавливать из пакета пластин, контактирующих между собой по плоскостям,

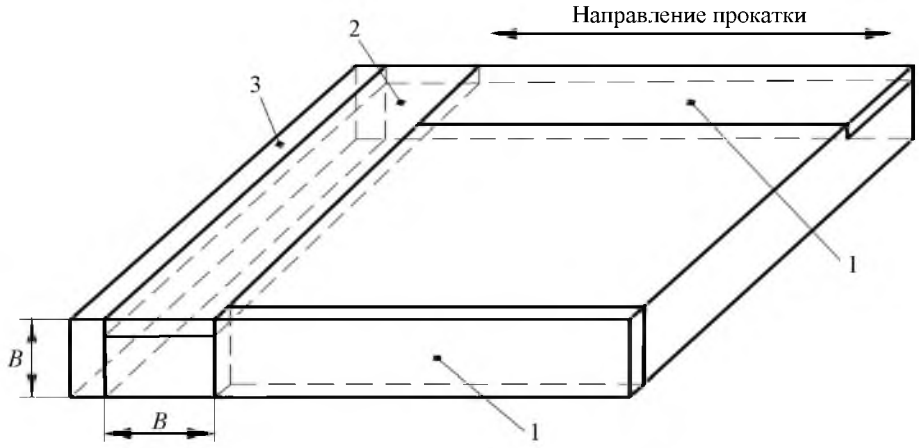


Рис.1. Способ изготовления пластин в системе демпфирующего инструмента

параллельным опорной поверхности державки (рис.1). Пластины вырезаются из листового проката с продольной 1, поперечной 2 и вертикальной 3 ориентацией по плоскости относительно направления их прокатки, а затем собираются в пакет с учетом угла разориентировки текстуры между пластинами.

При колебаниях, возникающих в процессе механической обработки, характеристика поведения стержня державки при малых деформациях описывается с помощью закона Гука, с учетом сопротивлений трения в неподвижных соединениях между пластинами и внутреннего трения в материале державки. Обусловленные наличием текстуры материала неупругие эффекты внутреннего трения, связанные с перемещениями дислокаций, вызывают необратимые гистерезисные потери энергии внутри металла державки при механических колебаниях [1, 4]. Для достижения наибольшего демпфирующего эффекта разориентация текстуры деформации в двух соседних пластинах должна быть максимальна. Тогда при переходе границы раздела колебательная волна меняет свое направление, в результате чего происходит рассеяние энергии колебаний. Если величина разориентации текстуры деформации мала, диссипация энергии незначительна. Поэтому в предлагаемом техническом решении пластины державки должны быть ориентированы таким образом, чтобы при переходе от одной пластины к другой текстура деформации изменялась на $90 \pm 10°$ относительно действия на державку основной (тангенциальной) составляющей силы резания.

На рис.2 приведены схема резания и направление сил резания, по которым ориентируется текстура пластин державки проходного резца. Все пластины имеют различную текстуру деформации в своей плоскости и в своем сечении, обладают различными физико-механическими, в том числе демпфирующими, свойствами относительно действия нагружающих державку составляющих силы резания [6, 13]. Под действием силы резания в верхних слоях державки возникают преимущественно максимальные растягивающие напряжения $\sigma_р$ (пластина 1), а в нижних опорных – сжимающие напряжения $\sigma_{сж}$ (пластина 3). Для стабилизации прочности различных зон и увеличения прочности и надежности всей державки ориентация текстуры деформации в пластинах сборной державки относительно сил резания должна соответствовать дополнительным условиям. Известно (см. рис.1), что максимальное сопротивление растягивающим напряжениям прокатанный металл оказывает в продольном направлении, а минимальное – в вертикальном направлении относительно направления прокатки. И, наоборот, максимальным сопротивлением сжимающим напряжениям прокатанный металл обладает в вертикальном направлении, а минимальным – в продольном. Сопротивление металла в поперечном направлении и устойчивость к растягивающим и сжимающим напряжениям имеют промежуточные значения. Направление текстуры

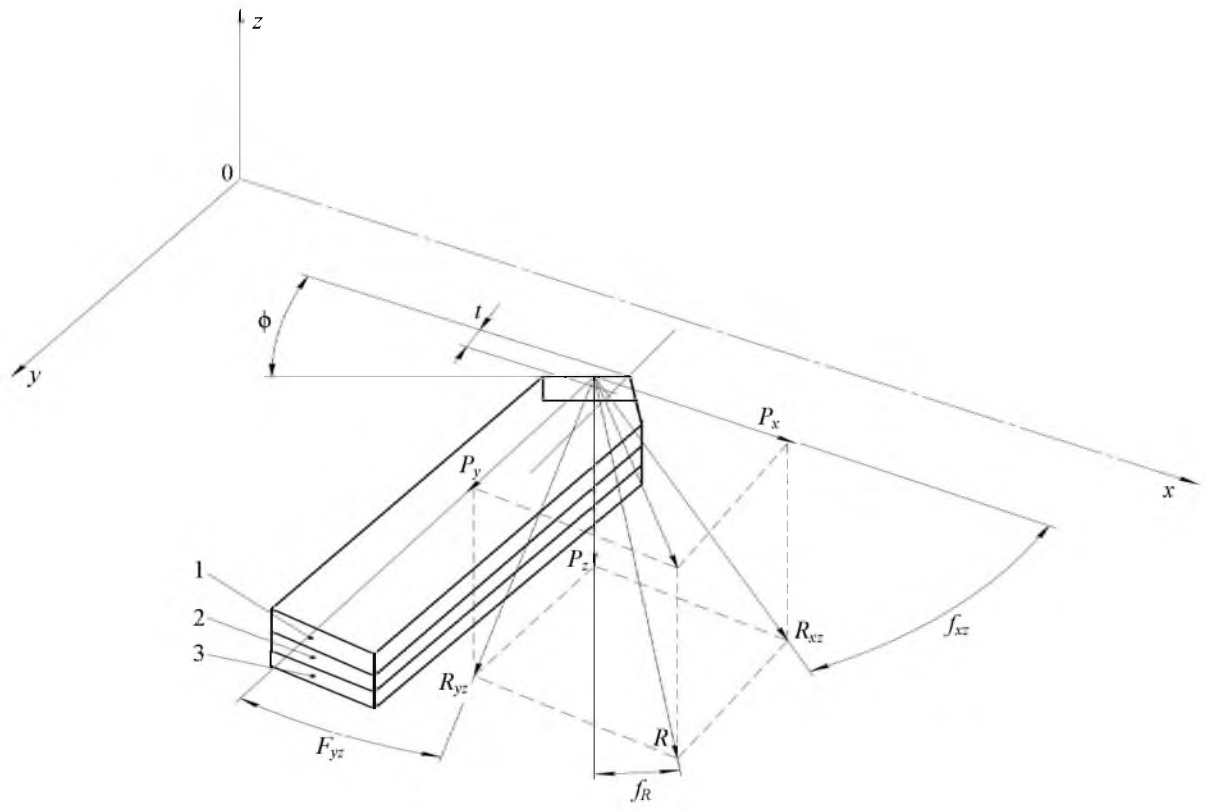


Рис.2. Схема резания и направление сил резания, по которым ориентируется текстура пластин державки проходного резца; *x*, *y*, *z* – направление координат на станке; ϕ – главный угол в плане; *t* – глубина резания; P_x – осевая сила резания; P_y – радиальная сила резания; P_z – тангенциальная сила резания; *R*, R_{xz}, R_{yz} – равнодействующие силы резания под углом f_R, f_{xz}, f_{yz}

прокатки в опорной пластине ориентировано параллельно тангенциальной составляющей силы резания. В пластине с закрепленным режущим клином направление прокатки ориентировано параллельно радиальной составляющей силы резания, а плоскость прокатки располагается перпендикулярно тангенциальной составляющей силы резания.

На рис.3 представлена схема сил резания при расточке отверстий и их взаимосвязь с текстурой пластин державки. Державку режущего инструмента изготавливают из склеенных между собой пластин, которые вырезают из листового проката и собирают в пакет по плоскостям вертикально относительно опорной плоскости державки, обеспечивая крайней левой частью слоя державки сдерживание растягивающих напряжений, а крайней правой частью слоя державки сдерживание сжимающих напряжений. Таким образом обеспечивается разориентировка текстуры деформации в двух крайних пластинах державки по отношению вектора равнодействующей сил резания *R* в диапазоне $90 \pm 10°$ ($\alpha_p < 80°$ и $\alpha_p > 100°$). В центральной пластине текстуру располагают в радиальном направлении, обеспечивая разориентировку по сравнению с крайними пластинами державки.

Пластины 1, 3 вырезаны так, что их плоскости ориентированы вертикально, а сечения – поперек направления прокатки и имеют продольную ориентировку текстуры относительно направления прокатки. Плоскость пластины 2 ориентирована вертикально, поперек направления прокатки, а плоскость ее поперечного сечения имеет продольную ориентировку. Таким образом, пластины 1, 3 и пластина 2 имеют различную текстуру деформации в плоскости и сечении, обладают различными физико-механическими, в том числе демпфирующими, свойствами относительно действия нагружающих державку сил (составляющих силы резания).

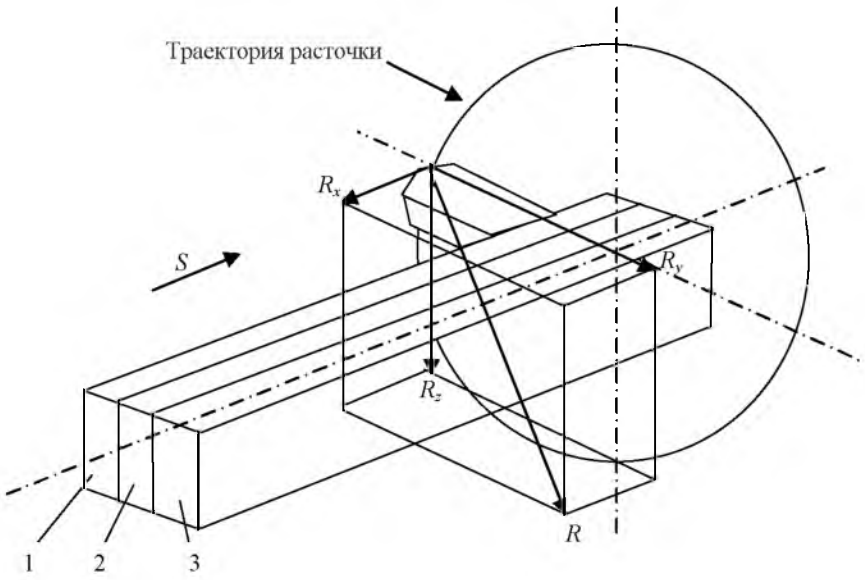


Рис.3. Расположение сил резания при расточке отверстий и их взаимосвязь с текстурой пластин державки

Вырезанные пластины собирают в пакет. Для достижения наибольшего демпфирующего эффекта разориентация текстуры деформации в двух соседних пластинах должна быть максимальна. Тогда колебательная волна при переходе границы раздела меняет свое направление, в результате чего происходит рассеивание энергии колебаний. При малой величине разориентации текстуры деформации диссипация энергии незначительна. Поэтому в предлагаемом техническом решении пластины державки ориентируют таким образом, чтобы при переходе от одной пластины к другой текстура деформации изменялась на 90°± 10° относительно действия на державку основной – тангенциальной составляющей силы резания.

На рис.4 показаны действия сил резания в верхних слоях державки, которые в процессе расточки создают преимущественно максимальные растягивающие напряжения $\sigma_р$, а в нижних, опорных, сжимающие напряжения $\sigma_{сж}$.

Для стабилизации прочности различных зон и увеличения прочности и надежности всей державки необходимы дополнительные условия по ориентации текстуры деформации в пластинах сборной державки относительно сил резания. Известно, что максимальное сопротивление растягивающим напряжениям прокатанный металл оказывает в продольном направлении, а минимальное – в вертикальном направлении относительно направления прокатки. Максимальным сопротивлением сжимающим напряжениям прокатанный металл обладает в вертикальном направлении, а минимальным – в продольном. Сопротивление металла в поперечном направлении растягивающим и сжимающим напряжениям имеет промежуточные значения.

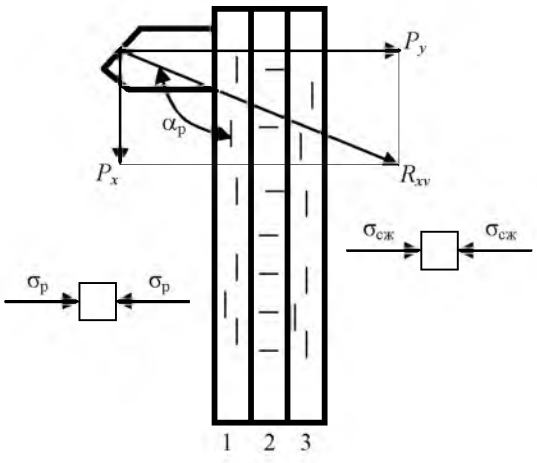


Рис.4. Схема действия сил резания в верхних слоях державки

Составная державка выполнена из пластин 1-3 с различной ориентировкой текстуры деформации относительно действия сил резания. Пластины 1-3 склеены между собой верти-

кально относительно опорной поверхности державки. Пластины 1, 3 имеют направление прокатки, ориентированное перпендикулярно тангенциальной составляющей силы резания P_z. Направление прокатки в пластине 2 ориентировано параллельно радиальной составляющей силы резания P_z. Плоскость прокатки в пластине 2 ориентирована перпендикулярно тангенциальной составляющей силы резания P_z.

В этом случае направление прокатки в пластинах 1 и 3 ориентируется параллельно действию осевой составляющей силы резания P_x. Поперечное направление прокатки в средней пластине 2 ориентируется параллельно действию тангенциальной составляющей силы резания P_z. Таким образом, между пластинами 1, 3 и 2 выдерживается прямой угол в текстуре деформации. Это позволяет при силе P_y обеспечить в крайне левой части слоя державки сдерживание растягивающих напряжений, а в крайне правой части слоя державки обеспечить сдерживание сжимающих напряжений. Расположение текстуры в крайних слоях державки вдоль силы P_x и ее конструктивное расположение позволяет сдерживать растяжение-сжатие и в направлении силы P_z. Текстура центральной части слоя державки должна стремиться с приближением к силе P_x, близкой 90°.

Энергия возникающих в процессе резания колебаний инструмента гасится не только вязкоупорным слоем клея, но и рассеивается внутри пластин, составляющих державку, вследствие анизотропии механических и физических свойств прокатанных (текстурованных) материалов, в том числе анизотропии частот и логарифмических декрементов собственных колебаний. При разориентировке текстуры деформации в двух соседних пластинах, отличной от 90°± 10°, степень диссипации энергии уменьшается, а технологические сложности при изготовлении пластин увеличиваются (увеличивается число операций и становится больше отходов металла).

Применение системы демпфирующего инструмента на операциях точения и внутреннего растачивания высокоточных изделий позволяет в процессе обработки заготовок обеспечить более эффективное динамическое гашение колебаний, чем известные, так как повышается коэффициент поглощения и демпфирования колебаний за счет большой диссипативной силы сопротивления материала державки с ориентированной в разных направлениях текстурой деформации металла.

Использование виброустойчивых свойств системы демпфирующего инструмента наиболее приемлемо при чистовой и тонкой обработке на высоких скоростных режимах резания при малой жесткости заготовок, переменной, непрерывной или разрывной поверхности обработки, когда предъявляются повышенные требования по геометрической точности обрабатываемого профиля детали и шероховатости поверхности.

В качестве материала для исследования анизотропии механических свойств горячекатаной стали использовали листовой прокат из конструкционной стали 34ХН4МФДА промышленной выплавки, слитки которой были прокованы на брамы и прокатаны со степенью обжатия, равной 7, в виде листов толщиной 70 мм. В начале прокатки температура составляла 1100-200 °С, температура окончания прокатки 800-900 °С, охлаждение с температуры прокатки производилось на воздухе. Термическая обработка листа состояла из двойной закалки с температуры 850-880 °С и высокого отпуска при температуре 590-620 °С с охлаждением в воде.

Образцы для проведения испытаний были вырезаны вдоль направления прокатки x, перпендикулярно направлению прокатки y и плоскости листа z. Испытания на статическое растяжение проводили на цилиндрических образцах машиной Instron-5000 (США), а испытания на ударный изгиб (ударную вязкость) – на образцах размером 10×10×55 мм с радиусом надреза 1 мм на маятниковом копре с запасом энергии удара 4635 Дж. Как показали результаты испытания, образцы, вырезанные поперек волокна, имеют пониженные механические свойства по сравнению с образцами, вырезанными вдоль волокна. Степень анизотропии металла в плоскости y-x составляет 4-6 % по прочностным характеристикам и

11-15 % – по пластическим. Направление волокна сказывается преимущественно на пластичности и вязкости стали. Наиболее значительно анизотропия проявляется в направлении, перпендикулярном направлению прокатки *z* (пространственная анизотропия). Степень анизотропии образцов, перпендикулярных плоскости прокатки, по прочностным характеристикам также невелика (2-4 %), в то время как относительное удлинение уменьшается в три раза, а сужение поперечного сечения – в шесть раз.

Известно, что результаты испытаний гладких образцов во многих случаях характеризуют средние, а не локальные свойства материала [14]. Наличие концентратора напряжений и динамический характер нагружения при испытании на ударный изгиб часто приводят к результатам, отличающимся от результатов статических испытаний гладких образцов, а разрушение при этом может носить более хрупкий характер. Поскольку ударная вязкость является одновременно функцией и прочности, и пластичности, эта характеристика металла наиболее чувствительна к анизотропии [10]. Основные причины анизотропии ударной вязкости стальных изделий – механическая текстура, главным образом волокнистость, ориентированное расположение оксидных, сульфидных и оксисульфидных включений и кристаллографическая текстура. Анизотропия ударной вязкости в плоскости прокатки не превышает 14 %, объемная анизотропия составляет 63 %, значения ударной вязкости поперечных и вертикальных образцов отличаются почти в три раза.

Поскольку на анизотропию ударной вязкости непосредственное влияние оказывают деформированные в направлении прокатки неметаллические включения, в процессе исследования дополнительно определяли содержание примесей в стали, в том числе серы и кислорода, которые полностью переходят в оксидные и сульфидные включения [14].

Микроструктура исследуемой стали, выявленная травлением в 4 %-ном спиртовом растворе азотной кислоты, показана на рис.5, *а*. После окончательной термической обработки микроструктура представляет собой мелкодисперсный сорбит отпуска. Согласно ГОСТ 5639-82 действительное зерно аустенита стали выявлено травлением в подогретом до 70 °С пересыщенном твердом растворе пикриновой кислоты с добавлением поверхностно-активного вещества синтола (рис.5, *б*). Зерно аустенита равноосное и соответствует номерам 8-9. Судя по рис.5, на микроструктурном уровне анизотропия металла не проявляется.

Неметаллические включения в исследуемой стали показаны на рис.6, *а*, *б*. Из рис.6 видно, что анизотропия свойств усиливается вытянутыми после прокатки строчками неметаллических включений, представляющими собой сульфидные и оксидные включения.

Микрофрактографический анализ изломов проводили на растровом электронном микроскопе PSEM-500 (Philips). Фрактографический анализ позволил установить, что поверхность изломов образцов, вырезанных в продольном *x* (рис.7, *а*) и поперечном *y* (рис.7, *б*) направлениях относительно направления прокатки имеет вязкий ямочный характер, что соответствует вязкому внутризеренному разрушению.

На всех этапах технологических переделов при производстве ответственных изделий необходимо учитывать анизотропные свойства конструкционных материалов, влияющие на них факторы [14], а также возможность создания изделий с заданной или регулируемой анизотропией. Известно, что анизотропия механических свойств обуславливает аномальное изменение скоростей упругих волн, траектории их распространения и коэффициента рассеивания (затухания), это определяет возможность использовать характерную для большинства реальных конструкционных материалов анизотропность для разработки и создания конструкции державки режущего инструмента с повышенными демпфирующими характеристиками.

Испытание режущего инструмента, державка которого изготовлена с повышенными демпфирующими характеристиками, проводилась на станке 16Б16Т1 в процессе операции точения закрепленной в центрах заготовки из стали 40Х с твердостью HRC 50. Заготовка имела диаметр 60 мм, длину 320 мм. В качестве режущего инструмента применяли два резца

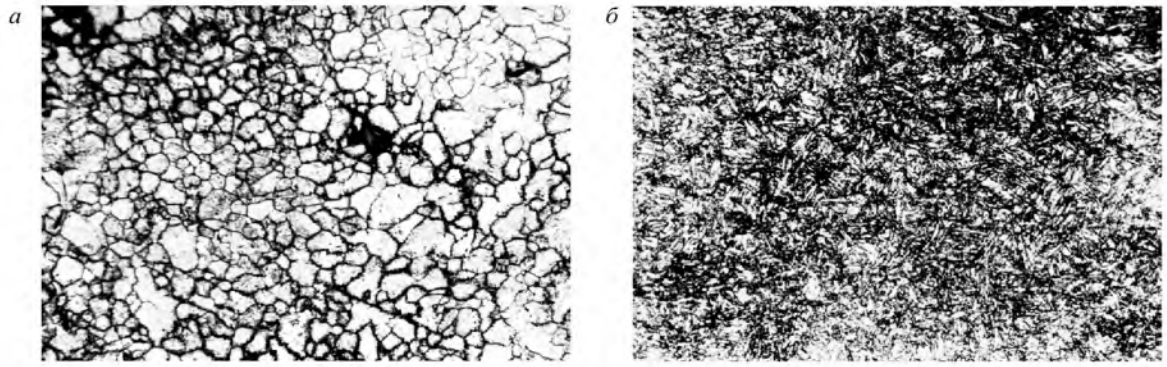


Рис.5. Микроструктура стали 34Х4МФДА после окончательной термической обработки, ×400 (*а*) и величина действительного аустенитного зерна стали после окончательной термической обработки, ×100 (*б*)

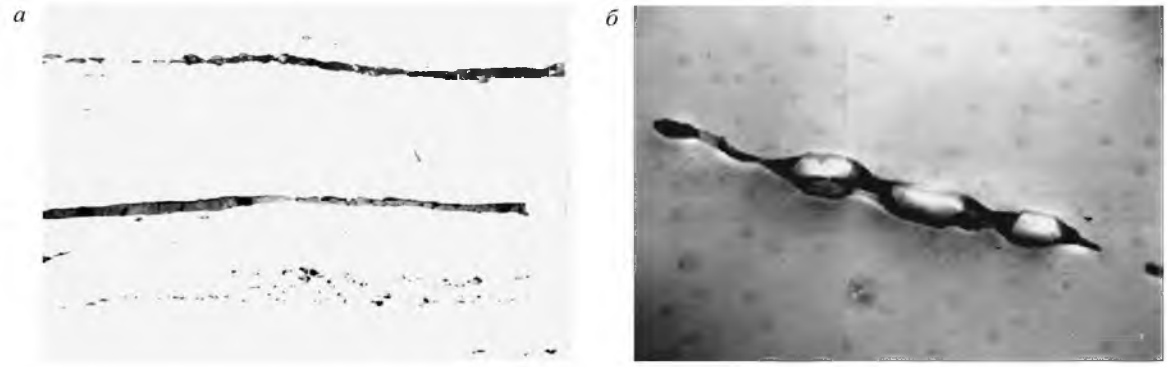


Рис.6. Неметаллические включения в различных участках исследуемой стали: *а* – ×100; *б* – ×1250

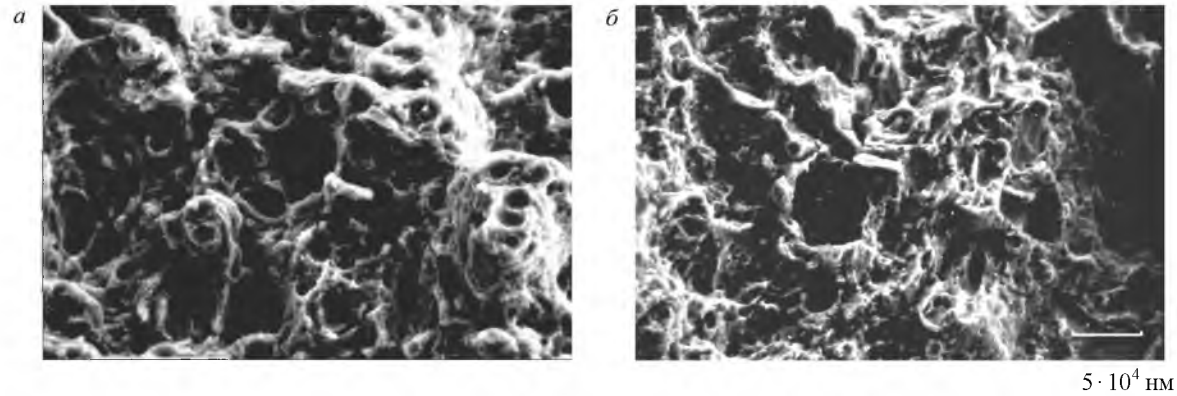


Рис.7. Изломы продольных (*а*) и поперечных (*б*) образцов, ×500

с одинаковым сечением 25×18 мм и длиной 150 мм, изготовленные из стали 40Х с твердостью HRC 63. В качестве режущего материала использовали режущую керамику марки ВОК-63 формы 2010-0162. В качестве прототипа рассматривали державку, изготовленную из трех пластин с одинаковой поперечной ориентировкой плоскости пластины (рис.8).

Державка с повышенными демпфирующими характеристиками изготавливалась из трех пластин с различной ориентацией текстуры деформации. В обоих случаях пластины склеивали между собой клеем марки «Циокрин» (ТУ 6-09-30-96). Испытания инструмента проводили в режиме резания: скорость резания v = 120 м/мин, подача s = 0,15 мм/об,

глубина резания $t = 1{,}0$ мм. При установке преобразователя по оси x на предлагаемой державке в процессе обработки получена амплитуда колебаний в 1,7-2,0 раза меньше, чем на державке, изготовленной по известному способу. Если период стойкости составляет 60 мин, износ задней поверхности режущей пластины в 1,6-1,8 раз меньше, шероховатость обработанной поверхности по параметру R_a в 1,7-1,9 раз ниже. Логарифмический декремент собственных затухающих колебаний державки по оси x, закрепленной в инструментальном магазине, в 2,5-3,0 раза выше по сравнению с трехслойной державкой с одинаковой ориентировкой текстуры деформации в соседних пластинах.

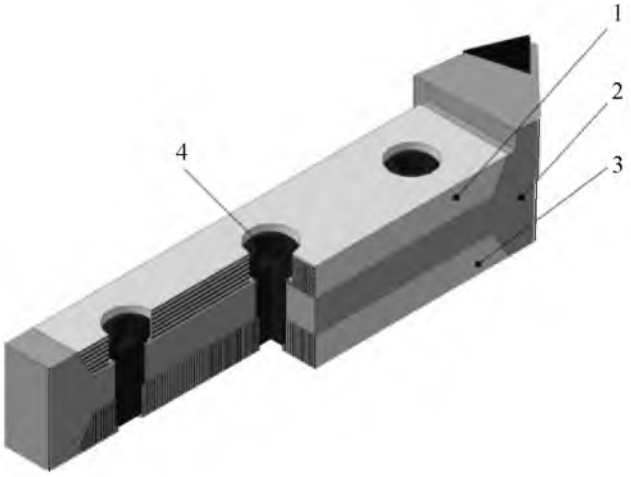


Рис. 8. Конструкция державки проходного резца с пластинами направленной текстуры

1 – поперечная; 2 – продольная; 3 – вертикальная ориентации структуры; 4 – отверстие для скрепления пластин

Сравнительные испытания в процессе механической обработки заготовок позволяют установить, что при использовании державок с неодинаково ориентированной структурой в пластинах обеспечивается более эффективное динамическое гашение колебаний, так как повышается коэффициент поглощения и демпфирования колебаний за счет большой диссипативной силы сопротивления материала державки с ориентированной в разных направлениях текстурой деформации металла. Вытянутые неметаллические включения, располагающиеся вдоль границ, слабо связанные с металлической матрицей или резко отличающиеся от нее по упругим характеристикам (пленочные эвтектические сульфиды), а также микроскопические несплошности металла вблизи границ неметаллических включений, располагающиеся по-разному в отношении прилагаемого в процессе точения внешнего воздействия, усиливают рассеивание энергии колебаний.

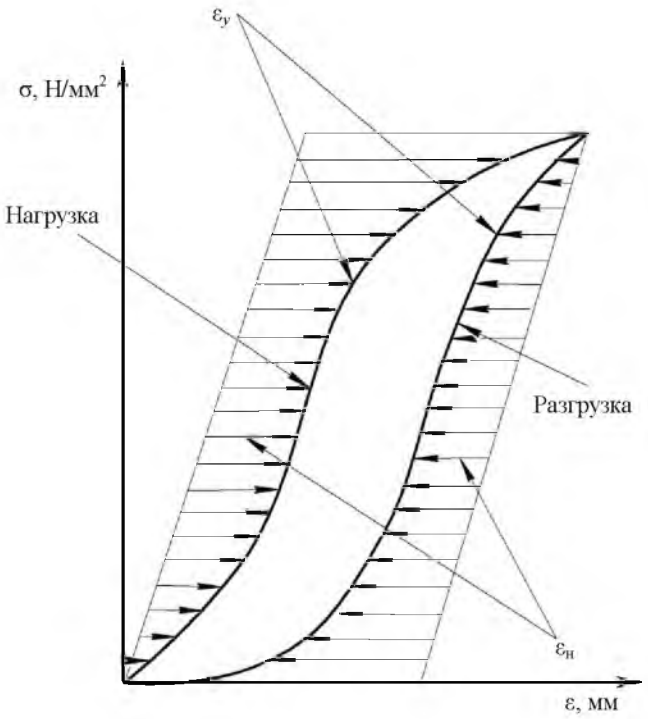


Рис.9. Петля гистерезиса диаграммы напряжение σ – деформация ε

$\varepsilon_у$ – упругая деформация, $\varepsilon_н$ – неупругая деформация

Неупругие эффекты, обусловленные наличием текстуры материала внутреннего трения и связанные с перемещениями дислокаций, вызывают необратимые гистерезисные потери энергии внутри металла державки при механических колебаниях. Из-за неполной упругости металлов линии диаграммы напряжение – деформация при нагрузке и разгрузке не совпадают, а образуют петлю гистерезиса (рис.9). Ее площадь характеризует энергию, рассеянную за один цикл нагружения. Внутреннее трение связано со статическим гистерезисом, когда

форма и площадь его петли не обусловлены временными релаксационными процессами и поэтому не зависят от частоты колебания, его амплитуды и материала державки [4, 6].

Колебательная волна при переходе границы между пластинами меняет свое направление, в результате чего происходит рассеяние энергии колебаний. При малой величине разориентации текстуры пластин рассеивание энергии незначительно. В предлагаемом техническом решении пластины ориентируются направлением текстуры деформации на 90°± 10° относительно друг друга.

Металлы с решеткой объемно-центрированного куба, как известно, имеют существенную анизотропию своих свойств [1, 7, 12]. В них часто наблюдается четко выраженный переход в хрупкое состояние, определяемый наличием хрупких включений, температурой, условиями приложения нагрузки и другими факторами. Отжиг и рекристаллизация горячекатаных листов приводит к перераспределению включений и изменению текстуры. Это изменение текстуры приводит к снижению прочности и вязкости в направление нормали к листу.

В табл.1 приведены результаты испытаний механических свойств образцов из горячекатаных стальных листов марки ВСт3 толщиной от 30 до 40 мм [2]. Результаты свидетельствуют о значительной анизотропии механических свойств, особенно относительного удлинения и сужения, а также ударной вязкости.

Таблица 1

Механические свойства стального листа

Направление прокатки	Предел текучести $\sigma_т$, МПа	Временное сопротивление $\sigma_в$, МПа	Относительное удлинение σ, %	Относительное сужение Ψ, %	Ударная вязкость RCU, Дж/см^2
Вдоль	237	402	35,9	63,3	42
Поперек	235	402	29,4	55,3	29
По высоте	322	402	7,0	11,8	16

Анизотропия механических свойств в материалах с направленной текстурой существенным образом зависит от схемы напряженно-деформированного состояния при испытаниях. На рис.10 показано изменение условного предела текучести у низкоуглеродистой стали с 3 % кремния, в зависимости от угла к направлению прокатки, где анизотропия достигает 30 %.

Зависимость модуля нормальной упругости хромомолибденовой стали в плоскости прокатки от угла к направлению прокатки после горячей деформации показана на рис.11 [3]. Из рис.11 видно, что различие значения модуля упругости составляет 15 % после прокатки и 10 % после отжига, это связано с текстурой деформации.

При статическом нагружении образцов на этапах упругой и упругопластической деформации анизотропия характеристик незначительна, но резко возрастает при переходе к большим пластическим деформациям, перед разрушением. Механическая текстура во многих практических случаях определяет анизотропию свойств. При этом возможны два механизма влияния:

• собственное влияние кристаллографической текстуры в связи с анизотропией модуля упругости и соответствующих ему деформаций;

• усиление влияния неметаллических включений в связи с прогрессирующим увеличением площади поверхности в процессе деформации сплава и разрушения с учетом того, что критическая длина трещин, например для стали с пределом текучести 1700 МПа, составляет 0,2-0,5 мм [8, 9].

Для определения направления текстуры в пластинах державки и оценки величины анизотропии были проведены исследования по определению механических свойств материала,

используемого для изготовления в проектируемой многослойной державке. Испытания проводились в лаборатории при помощи универсальной машины TIRAtest 2820, которая предназначена для измерений силы и изменений линейных размеров образцов из металла на растяжение, сжатие и изгиб при статических режимах нагружения. Машина представляет собой блочно-модульную конструкцию, состоящую из основания, на котором закреплена рама с подвижной и неподвижной траверсами, электродвигатель привода, электронного блока управления и компьютера. Подвижная траверса перемещается по направляющим колоннам с помощью винтовых пар. На подвижной траверсе закреплен тензорезисторный датчик силы, который вместе с системой коммутации и регистрации измерений является силоизмерительным устройством. Нагрузка прикладывается к испытуемому образцу последовательно с датчиком силы.

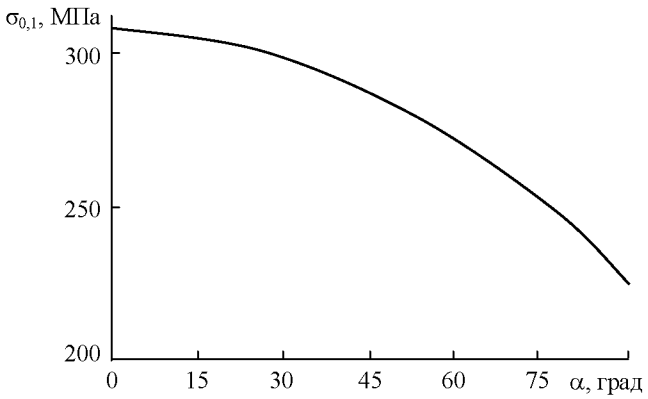


Рис.10. Изменение условного предела текучести в зависимости от угла к направлению прокатки

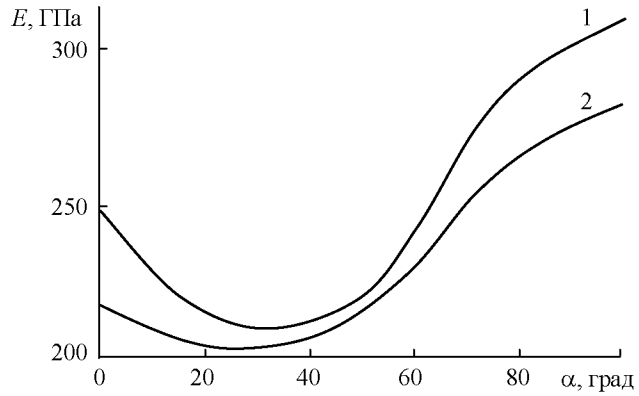


Рис.11. Изменение модуля нормальной упругости в зависимости от угла к направлению прокатки: 1 – после прокатки; 2 – после отжига

Принцип действия силоизмерительного устройства машины TIRAtest 2820 заключается в преобразовании силы, приложенной к испытуемому образцу, в электрический сигнал, передающийся в электронный блок управления. Управление всеми операциями производится с компьютера с использованием программного обеспечения, позволяющего в автоматическом режиме осуществлять измерения, запись результатов измерений в графической форме, а также в форме различных протоколов. Для исследований использовался листовой прокат из стали 45 (ГОСТ 1577-93). Образцы вырезались в трех направлениях: продольно прокатки (В), перпендикулярно (С) и вертикально (А).

Образцы изготавливались по ГОСТ 1497-84, тип V, номер 7, начальный диаметр образца $d_0 = 5$ мм с начальной расчетной длиной $l_0 = 5d_0 = 25$ мм. Термическая обработка проводилась в следующей последовательности: закалка – нагрев до температуры 850 °С, охлаждающая среда – масло; отпуск – нагрев до температуры 200 °С, охлаждающая среда – воздух [7]. Проверка на твердость каждого образца проводилась твердомером ТР 5014, затем окончательная обработка точением начального диаметра образца в размер $d_0 = 5_{-0,012}$ мм.

В табл.2 представлены результаты исследований образцов листового проката, полученные методом растяжения. Данные табл.2 свидетельствуют о наличии анизотропии в листовом прокате для изготовления пластин разрабатываемой многослойной державки. Термическая обработка не изменила наличия анизотропии в листовом прокате относительно данных табл.2. Значительная анизотропия наблюдается относительного удлинения и сужения, максимальное значение в образцах В, минимальное в образцах А.

Таблица 2

Средние значения механических свойств образцов из листового проката

Направление прокатки	Твердость образца, HRC	Предела текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности $\sigma_в$, МПа	Относительное удлинение $\delta_{ср}$, %	Относительное сужение $\Psi_{ср}$, %
A	37	1281	1350	0,71	6,29
B	37,2	1219	1334	5,03	28,38
C	36,8	1212	1365	2,36	18,8

Таким образом, для сталей промышленного производства анизотропия свойств обусловлена преимущественно не параметрами микроструктуры, а структурной неоднородностью, количеством и морфологией неметаллических включений. При увеличении структурной неоднородности материала возрастает его демпфирующая способность, что может быть использовано для снижения автоколебаний на уровне технологической подсистемы «инструмент» в процессе высокоскоростного тонкого и чистового точения деталей типа «тел вращения».

Проведенные исследования с цельным резцом и многослойной державкой на вибродиагностической установке «Efector octavis» позволили получить снижение уровня вибраций у многослойной державки на 30-35 % (рис.12, 13).

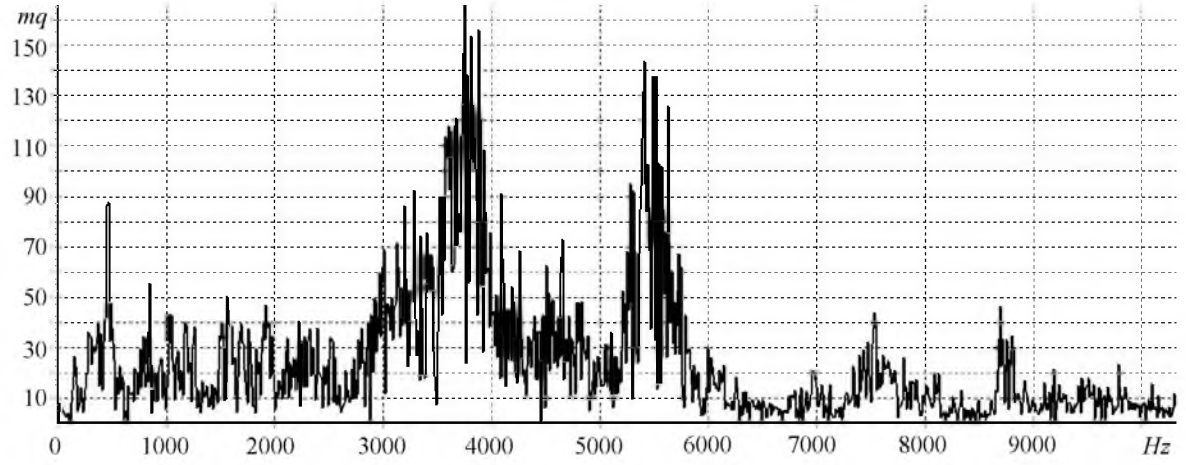


Рис.12. Виброперемещение при точении резцом с цельной державкой

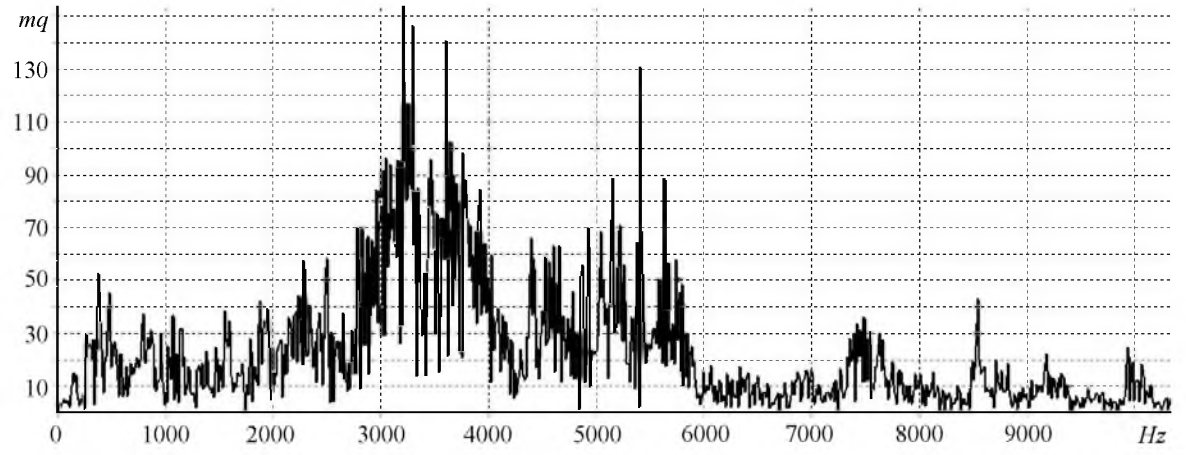


Рис.13. Виброперемещение при точении резцом с многослойной державкой

Анизотропия механических свойств, связанная с механической текстурой деформации, обуславливает изменение скоростей упругих волн, траектории их распространения и коэффициента рассеивания (затухания) в различных направлениях, это определяет возможность использования характерной для большинства конструкционных материалов анизотропности при разработке и создании конструкции державки режущего инструмента с повышенными демпфирующими характеристиками. Использование виброустойчивых свойств державок с такими характеристиками целесообразно при чистовой и тонкой обработке на высоких скоростных режимах резания, при малой жесткости заготовок, переменной, непрерывной или разрывной поверхности обработки, когда предъявляются повышенные требования к геометрической точности обрабатываемого профиля детали и шероховатости поверхности.

Исследования проводятся при финансовой поддержке Минобрнауки России по выполнению научно-исследовательской работ в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности, номер проекта 9.2642.2014/К от 19 июня 2014 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Анастасиади П.* Неоднородность и работоспособность стали / П.Анастасиади, М.С.Сильников. СПб.: Издательский дом «Полигон», 2002. 624 с.

2. *Ашкенадзи Е.К.* Анизотропия конструкционных материалов: Справочник / Е.К.Ашкенадзи, Е.С.Бодис. Л.: Энергия, 1980. 148 с.

3. *Бармин Б.Н.* Вибрации и режимы резания. М.: Машиностроение, 1985. 72 с.

4. *Бородкин М.М.* Рентгенографический анализ текстуры металлов и сплавов / М.М.Бородкин, Е.Н.Спектор. М.: Металлургия, 1981. 272 с.

5. *Вейц В.Л.* Моделирование процесса стружкообразования при лезвийной механической обработке / В.Л.Вейц, В.В.Максаров // Станки и инструмент. 2002. № 4. С.13-15.

6. *Вишняков Ю.Д.* Теория образования текстур в металлах и сплавах. М.: Наука, 1979. 329 с.

7. *Вишняков Ю.Д.* Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах / Ю.Д.Вишняков, В.Д.Пискарев. М.: Металлургия, 1989. 254 с.

8. *Глебов А.Г.* Влияние неметаллических включений на стойкость к разрушению стальной плиты высокой прочности проката / А.Г.Глебов, А.С.Духовный // Прочность и разрушение сталей при низких температурах. М.: Металлургия, 1990. С.86-94.

9. *Золоторевский А.С.* Механические свойства металлов. М.: Металлургия, 1983. 352 с.

10. *Леонидов П.В.* Повышение эффективности процесса тонкой лезвийной обработки при точении за счет анизотропных свойств режущего инструмента / П.В.Леонидов, В.В.Максаров, Ю.Ольт // Металлообработка. 2010. № 1. С.16-23.

11. *Максаров В.В.* Теория и практика моделирования и управления в области прогнозирования динамических свойств технологических систем / В.В.Максаров, Ю.Ольт // Металлообработка. 2012. № 2. С.7-13.

12. *Микляев П.Г.* Анизотропия механических свойств металла / П.Г.Микляев, Я.Б.Фридман. М.: Металлургия, 1986. 224 с.

13. *Maksarov V.V* Increasing the efficiency of external turning by using the multiple layer construction of the cutting tool holder / V.V.Maksarov, J.Olt, M.Madissoo // USB Proceedings. IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing. Tampere. Finland. 2012. P.6-11.

14. *Maksarov V.* Materjalide Loiketeooria ja Loikurid / V.Maksarov, J.Olt. Tartu: Eesti Maaulikool, 2008. 132 p.

REFERENCES

1. *Anastasiadi P., Silnikov M.S.* Neodnorodnost' i rabotosposobnost' stali (*Heterogeneity and performance of steel*). St Petersburg: Izdatel'skij dom «Polygon», 2002, p.624.

2. *Ashkenadzi E.K., Bodies E.S.* Anizotropija konstrukcionnyh materialov (*The anisotropy of structural materials*): Spravochnik. Leningrad: Jenergija, 1980, p.148.

3. *Barmin B.N.* Vibracii i rezhimy rezanija (*Vibration and cutting modes*). Moscow: Mashinostroenie, 1985, p.72.

4. *Borodkin M.M., Spector E.N.* Rentgenograficheskij analiz tekstury metallov i splavov (*Radiographic texture analysis of metals and alloys*). Moscow: Metallurgija, 1981, p.272.

5. *Weitz V L., Maksarov V V.* Modelirovanie processa struzhkoobrazovanija pri lezvijnoj mehanicheskoj obrabotke (*Simulation of chip formation during blade machining*). Stanki i instrument. 2002. N 4, p.13-15.

6. *Vishnyakov Ju.D.* Teorija obrazovanija tekstur v metallah i splavah (*The theory of texture formation in metals and alloys*). Moscow: Nauka, 1979, p.329.

7. *Vishnyakov Ju.D., Piskarev V.D.* Upravlenie ostatochnymi naprjazhenijami v metallah i splavah (*Control of residual stresses in metals and alloys*). Moscow: Metallurgija, 1989, p.254.

8. *Glebov A.G., Duchovni A.S.* Vlijanie nemetallicheskih vkljuchenij na stojkost' k razrusheniju stal'noj plity vysokoj prochnosti prokata (*The influence of nonmetallic inclusions on the fracture resistance of the high strength steel plate rolled*). Prochnost' i razrushenie stalej pri nizkih temperaturah. Moscow: Metallurgija, 1990, p.86-94.

9. *Solotorevsky A.S.* Mehanicheskie svojstva metallov (*Mechanical properties of metals*). Moscow: Metallurgija, 1983, p.352.

10. *Leonidov P.V., Maksarov V.V., Olt J.* Povyshenie jeffektivnosti processa tonkoj lezvijnoj obrabotki pri tochenii za schet anizotropnyh svojstv rezhushhego instrumenta (*Improving efficiency of the process of thin blade processing when turning due to anisotropic properties of a cutting tool*). Metalloobrabotka. 2010. N 1, p.16-23.

11. *Maksarov V.V., Olt J.* Teorija i praktika modelirovanija i upravlenija v oblasti prognozirovanija dinamicheskih svojstv tehnologicheskih sistem (*Theory and practice of modeling and control in the prediction of the dynamic properties of process systems*). Metalloobrabotka. 2012. N 2, p.7-13.

12. *Miklyaev P.T., Friedman Ja.B.* Anizotropija mehanicheskih svojstv metalla (*Anisotropy of mechanical properties of metals*). Moscow: Metallurgija, 1986, p.224.

13. *Maksarov V.V., Olt J., Madissoo M.* Increasing the efficiency of external turning by using the multiple layer construction of the cutting tool holder. USB Proceedings. IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing. Tampere, Finland. 2012, p.6-11.

14. *Maksarov V., Olt J.* Materjalide Loiketeooria ja Loikurid (*Cutting of materials*). Tartu: Eesti Maaulikool, 2008, p.132.

IMPROVING THE PRECISION OF MANUFACTURING POWER HYDRAULIC CYLINDERS OF POWERED ROOF SUPPORTS BASED ON A VIBRATION-DAMPING TOOLING SYSTEM

V.V.MAKSAROV, *Dr. of Engineering Sciences, Professor, maks78.54@mail.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia
Ju.OLT, *Dr. of Engineering Sciences, Professor, jyri.olt@emu.ee*
Estonian University of Life Sciences, Tartu, Estonia

The article deals with a new system of a vibration-damping tool, the effect of which is achieved by a combination of the multi-layer principle and the use of anisotropic properties of sheet metal. Operation of such tool systems in turning operations can reduce high-frequency vibrations arising in the process of cutting due to the ordered disorientation of anisotropic plate texture of a multilayer modular tool holder that allows you to efficiently dissipate oscillatory wave energy at the boundary of transition between the plates of the tool holder. This method allows increasing the resistance of the tool cutting edge significantly and expanding the technological capabilities for the effective selection of cutting modes to ensure compliance with requirements for dimensional and geometric accuracy, quality of processed surfaces of powered roof supports, hydraulic units, mining machinery and equipment.

***Key words*:** cutting tool, vibration-damping tool, external tool, boring tool, damping coefficient, anisotropic structure of a tool holder material.