МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
АВТОНОМНОЙ РЕСПУБЛИКИ КРЫМ
РЕСПУБЛИКАНСКОЕ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ
«КРЫМСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ КРЫМСКОГО ИНЖЕНЕРНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Выпуск 24

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Симферополь
2010

Свидетельство о государственной регистрации печатного средства массовой информации выдано Государственным комитетом телевидения и радиовещания Украины 12.01.2006 г. Серия КВ № 10833.

Сборник включен в перечень научных специальных изданий.
Постановление президиума ВАК Украины № 1-05/2 от 10.03.2010 г.

Редакционная коллегия:

Якубов Ф. Я., д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники Узбекистана, заслуженный работник народного образования Украины (главный редактор)
Кропотова Н. В., к.х.н., доцент, проректор по научной работе (зам. главного редактора)
Абдулгазис У. А., д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники АРК (зам. главного редактора)
Бабицкий Л. Ф., д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники АРК
Подригало М. А., д.т.н., профессор
Шмигальский В. Н., д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники Украины
Полянский А. С., д.т.н., профессор
Волков В. П., д.т.н., профессор

Фазылова А. Р. (ответственный редактор)

Печатается по решению Ученого совета Республиканского высшего учебного заведения «Крымский инженерно-педагогический университет». Протокол № 1 от 31.08.2010 г.

Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. Выпуск 24. Технические науки. – Симферополь : НИЦ КИПУ, 2010. – 86 с.

В сборник включены статьи по инженерно-техническим направлениям научно-исследовательской деятельности, подготовленные профессорско-преподавательским составом, научными работниками, аспирантами и студентами Крымского инженерно-педагогического университета, а также других вузов.

Для научных работников, преподавателей, аспирантов и студентов высших учебных заведений.

Друкується за рішенням Вченої ради Республіканського вищого навчального закладу «Кримський інженерно-педагогічний університет». Протокол № 1 от 31.08.2010 р.

Вчені записки Кримського інженерно-педагогічного університету. Випуск 24. Технічні науки. – Сімферополь : НІЦ КІПУ, 2010. – 86 с.

У збірник вміщено статті з інженерно-технічних напрямів науково-дослідної діяльності, які підготовлені професорсько-викладацьким складом, науковцями, аспірантами, студентами Кримського інженерно-педагогічного університету, а також інших ВНЗ.

Для науковців, викладачів, аспірантів і студентів вищих навчальних закладів.

© НИЦ КИПУ, 2010

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел 1. ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Якубов Ф. Я., Ким В. А. Структурно-энергетические основы упрочнения материалов……... 4

Абдулгазис Д. У., Якубов Ч. Ф. Возможности минимизированной подачи к режущим кромкам сверла масляных СОТС с эндотермическим эффектом……. 10

Доброскок В. Л., Абдурайимов Л. Н., Чернышов С. И. Рациональная ориентация изделий при их послойном формообразовании на базе исходной триангуляционной 3D модели…….……..... 13

Иззетов Н. А., Османов Э. Р. Пути повышения точности и производительности финишной обработки глубоких отверстий…….. 21

Падерин В. Н., Хачикова И. С. Способ литья под давлением в вакууме с двумя камерами прессования……. 25

Усеинов Б. К. Обеспечение равномерного давления инструмента на обрабатываемую поверхность при хонинговании отверстий……... 30

Раздел 2. АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ

Артемов Н. П., Лебедев А. Т., Алексеев О. П., Волков В. П., Подригало М. А., Полянский А. С. Метод парциальных ускорений и его применение при исследовании динамики мобильных машин (в порядке обсуждения)……...…….. 33

Подзноев Г. П., Абдулгазис У. А. Особенности темодинамического цикла двухтактного Н-дизеля с использованием алюмогидридного энергоносителя и пероксида водорода……. 36

Менумеров Э. Р., Якубов Ч. Ф. Повышение антиокислительной стойкости смазочных технологических сред растительной природы путем их химической модификации……..…….. 41

Подригало М. А., Байцур М. В. Определение удельной мощности двигателя автомобиля по условиям скоростного и динамического режимов движения…….. 45

Подригало М. А., Абдулгазис А. У., Клец Д. М. Модель контакта неподвижного автомобильного колеса с дорогой……..…… 50

Шелудченко В. В. Аналіз особливостей експлуатації, які впливають на керованість та стійкість руху автомобілів з АБС……. 55

Эреджепов М. К. Из опыта определения технического состояния электростартерной системы пуска мотортестером, без снятия электростартера с ДВС……... 58

Раздел 3. СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

Бабицкий Л. Ф., Мищук С. А. Обоснование технологии упрочнения зубчатых ножей почвообрабатывающих машин……..……. 65

Бекиров Л. Р., Бекиров Р. Н. Технология сельскохозяйственных работ в структурно-логических схемах ……. 68

Бекиров Р. Н. Динамика изменения величины капель распыливаемой струи у вентиляторных опрыскивателей……. 72

Раздел 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Билялова Л. Р., Ситшаева З. З., Билялова Э. В. Оптимизация структуры системы сотовой связи с учетом параметров электромагнитного излучения……..….. 76

Большаков А. П., Абдулгазис У. А. Патентные исследования в конкурентном соперничестве…… 79

РАЗДЕЛ 1. ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.891:620.192.4

Якубов Ф. Я., Ким В. А.

СТРУКТУРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УПРОЧНЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

У представленій статті розглянуто та оцінено внесок різних структурних чинників у зміцнення, необхідних для зсуву дислокацій в ідеальному кристалі, домішкових атомів, дисперсних частинок, розмірів і меж зерен, розвитку дислокацій і дисклінацій. Єдність усіх механічних тривких характеристик ($\sigma_{вр}$, $\sigma_{вс}$, $\tau_{ср}$ тощо) полягає у тому, що вони відображають внутрішній енергетичний стан твердого тіла, а невідповідність їх чисельних величин пояснюється різницею в об'ємах розповсюдження роботи пластичної деформації.

Ключові слова: *тривкість, деформаційне зміцнення, зносостійкість, дефекти кристалічної будови, домішкові атоми, дислокації, дисперсні частки, субструктура.*

В представленной статье рассмотрен и оценен вклад различных структурных факторов в упрочнение, необходимых для сдвига дислокаций в идеальном кристалле, примесных атомов, дисперсных частиц, размеров и границ зёрен, развития дислокаций и дисклинаций. Единство всех механических прочностных характеристик ($\sigma_{вр}$, $\sigma_{вс}$, $\tau_{ср}$ и др.) заключается в том, что они отображают внутреннее энергетическое состояние твердого тела, а несоответствие их численных величин объясняется различием в объемах распространения работы пластической деформации.

Ключевые слова: *прочность, деформационное упрочнение, износостойкость, дефекты кристаллического строения, примесные атомы, дислокации, дисперсные частицы, субструктура.*

In this article reviewed and evaluated the contribution of various structural factors in the hardening required for shear dislocations in a perfect crystal, impurity atoms dispersed particle size and grain boundaries of dislocations and disclinations. The combination of all mechanic durable features ($\sigma_{вр}$, $\sigma_{вс}$, $\tau_{ср}$) is in that they reflect their internal energetic state of solid object, but irrelatively of the numeric value is proved be diversity in range of work-spread of plastic deformation.

Key words: *strength, deformation hardening, wearability, defects of crystal structure, mixed atoms, dislocation, dispersed particles, substructure.*

Постановка проблемы. Обеспечение качества и производительности механической обработки металлов концентрируется вокруг ряда проблем, которые в научном и техническом плане продолжают оставаться злободневными. К этим проблемам в первую очередь можно отнести повышение общего уровня прочности, стойкости и надежности металлорежущего инструмента.

Анализ литературы. Прочность как сопротивляемость материала формоизменению и разрушению под действием внешних механических, тепловых, химико-окислительных, электрических и других воздействий является комплексным понятием и отображается системой независимых и взаимосвязанных показателей [1–6].

К ним, в частности, относят предел текучести, предел прочности при растяжении и сжатии, предел выносливости, ударную вязкость, температуру вязкоупругого перехода, относительное удлинение при разрыве, твердость и др. Перечисленные характеристики не исчерпывают все многообразие служебных прочностных требований, а отражают поведение материала в определенных, как правило, упрошенных схемах механического нагружения. Они не всегда в достаточной мере обеспечивают свойства материала в эксплуатационных условиях, но, тем не менее, на основе этих характеристик осуществляется выбор материала.

Цель статьи – раскрыть механизм и установление структурно-энергетических основ упрочнения материалов.

Изложение основного материала. Практически все удельные прочностные механические характеристики отображают работу разрушения материала в определенных схемах нагружения. Так, при испытании материала на растяжении работа разрушения определяется по формуле:

$$A = \int_0^{\Delta L_{кр}} \sigma S \times dL \approx \sigma_{вр} S \times dL_{кр}, \qquad (1)$$

где $\sigma_{вр}$ – предел прочности на растяжение;

S – площадь поперечного сечения образца;

$\Delta L_{кр}$ – абсолютное удлинение образца, предшествующее разрушению.

Удельную работу разрушения можно рассчитать по формуле:

$$a_{уд} = \frac{A}{S\Delta L_{кр}} \approx \sigma_{вр} \qquad (2)$$

Аналогичные рассуждения приводят к тому, что удельная работа разрушения при сжатии адекватна пределу прочности на сжатие ($a_{уд} \approx \sigma_{вс}$), а при срезе – пределу прочности на срез ($a_{уд} \approx \tau_{ср}$).

Подобные зависимости можно получить для всех видов разрушения. Повышение одной из прочностных характеристик приводит к адекватному увеличению других, указывая на существование тесной взаимосвязи между ними. Единство всех механических прочностных характеристик заключается в том, что они в большей или меньшей степени отображают внутреннее энергическое состояние твердого тела, а несоответствие их численных величин, выражаемых через $\sigma_{вр}$, $\sigma_{вс}$, $\tau_{ср}$ и др., определенных в различных схемах разрушения, может быть объяснено различием в объемах распространения сопутствующей работы пластической деформации. Действительно, при одной и той же площади поперечного сечения образца в случае растяжения объем распространения пластической деформации приходится на «шейку» или зону неоднородной и неустойчивой пластической деформации, при сжатии – на всю длину образца, а при срезе – на узкую зону, примыкающую к плоскости среза, толщиной несколько десятков микрометров.

Сопротивляемость материала различным разрушающим воздействиям обеспечивается определенным набором структурных свойств, изменяя которые можно целенаправленно управлять прочностью. Под упрочнением понимают любые структурные изменения, происходящие в материале при воздействии на него энергетическими потоками различной природы и приводящие к повышению прочностных свойств. Однако повышение отдельных прочностных характеристик не означает обеспечение высоких эксплуатационных свойств во всех возможных схемах нагружения. Так, рост твердости металлических материалов повышает предел прочности растяжения и сжатия, но снижает усталостные свойства. Увеличение предела выносливости связывают с повышением пластичности и снижением твердости. Обеспечение износостойкости требует соблюдение строгих соотношений упругопластических свойств материала.

Например, сопротивляемость абразивному и адгезионному изнашиванию коррелирует с твердостью и пределом прочности [7; 8]. При водородном, окислительном, кавитационном и диффузионном изнашивании эксплуатационные свойства материала слабо связаны с прочностными характеристиками [9; 10].

На рис. 1 представлена обобщенная зависимость упругих и пластических свойств материала. Повышение прочности всегда сопровождается снижением пластичности и ухудшением обрабатываемости. Идеальный конструкционный материал должен обладать высокой прочностью и хорошей обрабатываемостью.

На рисунке такому материалу соответствует правая верхняя заштрихованная область относительно обобщенной зависимости.

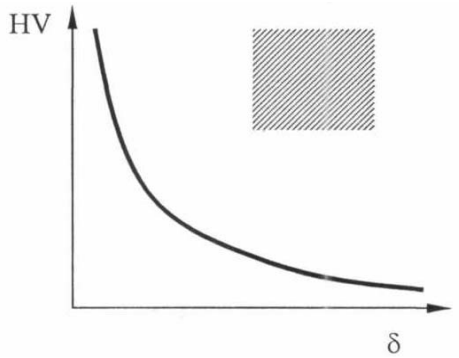


Рис. 1. Обобщенная зависимость упругих и пластических свойств материала.

Большинство металлических материалов, используемых в быту и производстве, представляет поликристаллические гетерогенные системы на основе твердых растворов внедрения и замещения с различной степенью стабильности. Поликристаллы обладают развитой системой межфазных, межзеренных и субзеренных границ. В составляющих поликристаллическую систему фазах всегда присутствуют дефекты кристаллического строения, распределение и концентрация которых находится в тесной взаимосвязи с наличием атомов легирующих элементов и примесей.

Совокупность перечисленных составляющих образует структуру материала, а различные их комбинации отвечают различным структурным состояниям сплава и определяют тот или иной набор структурно чувствительных характеристик, присущих материалу в определенном структурном состоянии.

Вклад различных структурных факторов в упрочнение в предположении аддитивности влияния отдельных механизмов на примере повышения предела текучести может быть представлен следующей зависимостью

$$\sigma_т = \sigma_{то} + \Delta\sigma_{тв.р.} + \Delta\sigma_{дч} + \Delta\sigma_{дисл.} + \Delta\sigma_{гр.з.} + \sigma_{суб.з.}, \qquad (3)$$

где $\sigma_{то}$ – напряжения Пайерлса-Набарро;

$\Delta\sigma_{тв.р.}$ – упрочнение, обусловленное растворением примесных атомов по механизмам внедрения и замещения;

$\Delta\sigma_{дч}$ – упрочнение дисперсными частицами;

$\Delta\sigma_{дисл.}$ – упрочнение за счет развития дислокаций и дисклинаций;
$\Delta\sigma_{гр.з.}$ – зернограничное упрочнение;
$\sigma_{суб.з.}$ – субзеренное упрочнение.

Все слагаемые выражения (3) раскрывают роль различных дефектов кристаллического строения. Так, $\Delta\sigma_{тв.р.}$ определяется плотностью точечных дефектов, $\Delta\sigma_{дисл.}$ – плотностью линейных дефектов, $\Delta\sigma_{гр.з.}$ и $\sigma_{суб.з.}$ отражают влияние поверхностных дефектов, а $\Delta\sigma_{дч}$ – объемных дефектов кристаллического строения.

Напряжение Пайерлса-Набарро представляет минимальное (критическое) касательное напряжение необходимое для сдвига дислокации в кристалле, в котором отсутствуют другие дефекты. Напряжение Пайерлса-Набарро в модельном представлении описывается формулой:

$$\sigma_{то} = \frac{2G}{1-\mu}\exp\left(-\frac{2\pi}{1-\mu}\times\frac{d}{b}\right), \qquad (4)$$

где G – модуль упругости при сдвиге;
μ – коэффициент Пуассона;
d – расстояние между соседними атомарными плоскостями;
b – межатомное расстояние в направлении скольжения равное вектору Бюргерса.

С увеличением расстояния между соседними атомарными плоскостями и уменьшением межатомного расстояния в направлении скольжения напряжение Пайерлса-Набарро снижается. Для плоскостей и направлений с плотнейшей упаковкой соотношение d/b обычно наибольшее, и по этим направлениям обычно происходит скольжение.

Упрочнение, обусловленное растворением примесных атомов внедрения и замещения, определяется процессами торможения дислокаций точечными дефектами кристаллического строения. Результатом такого взаимодействия является направленная диффузия примесных атомов в поле напряжений, создаваемых дислокациями, что приводит к неравномерному распределению атомов примеси в кристаллической структуре основного металла. Различают четыре варианта взаимодействия дислокаций с примесными атомами:

- упругое взаимодействие первого рода (размерное взаимодействие);
- упругое взаимодействие второго рода (взаимодействие по модулю упругости);
- химическое взаимодействие;
- электрическое (кулоновское) взаимодействие.

Так как каждый вид взаимодействия зависит от природы межатомных связей в кристалле, характера примесей и других факторов, то превалирующим может оказаться один из перечисленных типов взаимодействия или их совокупность.

Упругое взаимодействие первого рода связано с наличием поля упругих напряжений вокруг дислокации и вокруг примесного атома. Знак напряжения вокруг атома примеси зависит от соотношения атомарных радиусов элемента основы (r_o) и примеси (r). В растворах замещения атомы с радиусом $r < r_o$ замещают атомы основы и будут стремиться в сжатую область вокруг дислокаций. Внедренные атомы, а также атомы примеси с радиусом $r > r_o$, замещающие атомы основы в растворе, будут притягиваться растянутой областью дислокаций.

Облака примесных атомов закрепляют дислокацию и называются облаками Коттрелла. Роль облаков Коттрелла особенно велика в металлах, содержащих такие примеси внедрения как углерод и азот.

Упругое взаимодействие второго рода обусловлено тем, что примесные атомы или вакансии представляют собой малую область с иными упругими постоянными, чем у матрицы. Поэтому работа, затрачиваемая при движении дислокаций, отличается от работы, обусловленной обычным упругим взаимодействием. С понижением радиуса примесного атома энергия взаимодействия по модулю упругости возрастает, достигая максимальной величины при взаимодействии с вакансией. Взаимодействие второго рода вызывает увеличение концентрации вакансий вокруг дислокации и проявляется только на очень малых расстояниях.

Химическое взаимодействие возникает при наличии расщепленных дислокаций. В этом случае попадание примесного атома на дефект упаковки меняет в месте контакта электронную структуру металла, а, следовательно, и характер межатомной связи. Эти изменения могут приводить к уменьшению удельной энергии упаковки и увеличению расщепления, что создает энергетически выгодные условия для диффузии атомов примеси к дефекту упаковки. Повышение содержания примесей в слое дефекта упаковки называется атмосферой Судзуки. При образовании атмосферы Судзуки энергия дислокации уменьшатся, что также способствует ее закреплению.

Электрическое взаимодействие проявляется только в некоторых кристаллических структурах и заключается в следующем. При «суммировании» двух простых дислокаций может создаваться комбинация сложных дислокаций, важной особенностью которых является наличие разорванных связей на краю экстраплоскости. Существование дислокаций с оборванными связями характерно для полупроводниковых и ионных кристаллов. В этом случае оборванные связи в дислокациях выступают как акцепторы, за-

хватывающие электроны проводимости и тем самым создающие кулоновское взаимодействие между дислокациями и положительными ионами. Численные значения энергий взаимодействия дислокаций с точечными дефектами приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Энергия взаимодействия дислокаций с примесными атомами.

Тип взаимодействия	Расчетная формула	Средние значения, эВ	Вид дефекта
1. Упругое взаимодействие первого рода	$E_1 = \alpha G b r_0^3 \left(\frac{\Delta r}{r_0}\right) \sin\left(\frac{\theta}{r}\right)$	0,2…0,5 0,05…0,1 0,1	Межузельные атомы Атомы замещения Вакансии
2. Упругое взаимодействие второго рода	$E_2 = \Delta G \left(\frac{b^2}{r^2}\right)$	0,05…0,2	
3. Химическое взаимодействие	$E_3 = Db^2 \left(5 + \ln \frac{r\gamma}{Db^2}\right)$	0,05…0,1	
4. Электрическое взаимодействие	$E_4 = f \frac{e^2}{a}$	0,02	

Упрочнение дисперсными частицами второй фазы играет важную роль в повышении прочности, особенно дисперсно-твердеющих сплавов. Выделяют несколько моделей торможения дислокаций дисперсными частицами. Если расстояние между частицами второй фазы достаточно велико, то дислокация под действием касательных напряжений от приложенной нагрузки выгибается между ними, принимая волнообразную форму, а затем преодолевает частицы по механизму, сходному с процессом размножения дислокаций по модели Франка-Рида (рис. 2).

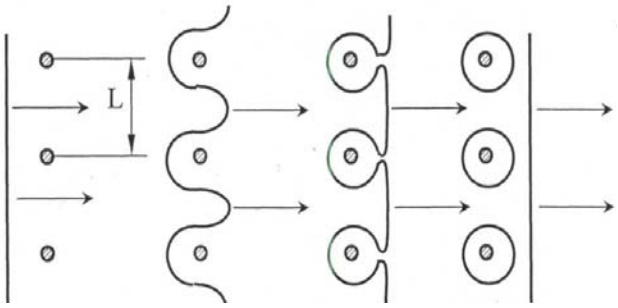


Рис. 2. Схема обхода частиц дислокациями в плоскости скольжения по Оровану.

Дислокация, проходя между дисперсными частицами, оставляет вокруг каждой из них дислокационное кольцо, при этом суммарная длина всех дислокаций возрастает, и в соответствии с этим увеличивается суммарная энергия дислокаций.

Повышение предела текучести за счет взаимодействия дислокаций с дисперсными частицами второй фазы описывается уравнением Орована:

$$\Delta\sigma_{\text{д.ч.}} = 0{,}25\left(1 + \frac{1}{1-\mu}\right)\frac{Gb}{\pi L}\ln\left(\frac{L}{2b}\right), \qquad (5)$$

где L – среднее расстояние между дисперсными частицами.

При наличии крупных дисперсных включений реализуется механизм обхода некогерентных частиц второй фазы, который заключается в поперечном скольжении, а при повышенных температурах – переползании (рис. 3). Локальное поперечное скольжение начинается после того, как скользящая дислокация, выгибаясь между частицами второй фазы, образует винтовые сегменты (см. рис. 3а). Эти сегменты могут совершать двойное поперечное скольжение, переходя в новую плоскость скольжения для обхода частицы и затем возвращаясь в плоскость, параллельную исходной (участки типа 1–2 на рис. 3б). Винтовые сегменты, имея разный знак, выгибаются навстречу один другому (рис. 3в) и аннигилируют, оставляя позади частиц призматическую петлю и образуя двойную ступеньку на продолжающей скользить дислокации (рис. 3г).

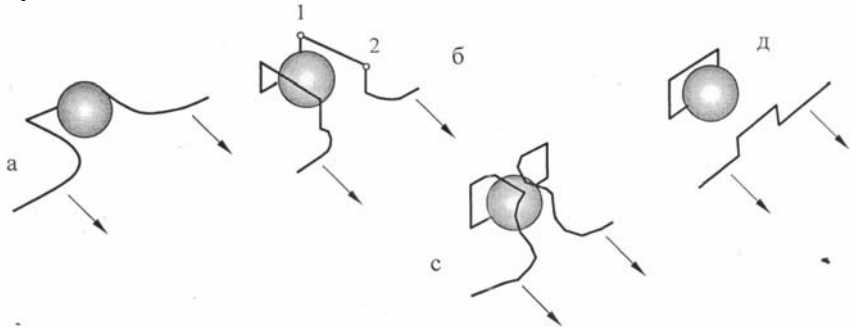


Рис. 3. Стадии локального поперечного скольжения при обходе дислокацией частиц второй фазы.

С уменьшением расстояния между частицами в соответствии с формулой (5) возрастает напряжение, необходимое для проталкивания между ними дислокаций, и может наступить момент, когда более легким вариантом является прохождение дислокации через тело частиц, как бы ее перерезание (рис. 4).

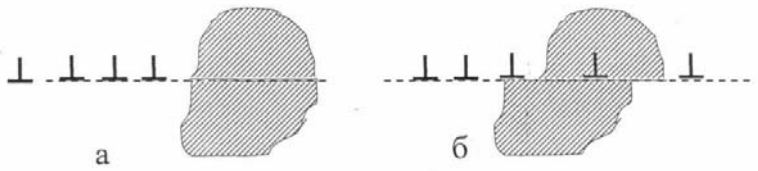


Рис. 4. Схема перерезания дисперсной частицы скользящей дислокацией.

Из-за того, что решетка частицы отличается от решетки матрицы, скользящая в матрице дислокация при вхождении в решетку частицы создает в ней сильное нарушение упаковки атомов вдоль плоскости сдвига. Частица сдвигается на величину вектора Бюргерса дислокации матрицы, который отличается от вектора трансляции решетки частицы. В результате внутри частицы возникают высокоэнергетические поверхности раздела, что является одной из причин торможения дислокаций.

Другая причина торможения дислокаций связана с увеличением поверхности раздела между матрицей и перерезанной частицей, на поверхности которой появляются ступеньки (см. рис. 4). Величина упрочнения за счет полукогерентных частиц и зон типа Гинье-Престона может быть оценена по выражению:

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta G}{4\pi} \times \frac{d}{L}. \qquad (6)$$

Еще одной причиной торможения дислокаций является наличие в матрице дальнедействующих полей упругих напряжений вокруг частиц. Такие напряжения возникают из-за разности в удельных объемах частиц и матрицы, из которой выделяется частица. Если выделение когерентно матрице, упругие деформации обеспечивают плавное сопряжение решеток с разными параметрами.

При повышении плотности свободных (решеточных) дислокаций в результате холодного или горячего наклепа прочность матрицы возрастает из-за появления неориентированных полей напряжений вокруг скопления дислокаций, их переплетения и блокировки действующих плоскостей скольжения, пересечения дислокаций границами двойников, дефектами упаковки, закреплением их вторыми фазами, наведенными пластической деформацией. При взаимодействии двух дислокаций с перпендикулярными векторами Бюргерса образуется так называемая «сидячая» дислокация, обладающая высокой устойчивостью и низкой подвижностью. Совокупность таких дислокаций образует «лес дислокаций», который вносит значительный вклад в повышение предела текучести. Даже при низкой плотности дислокаций ($\rho = 10^8 ...10^9$ см$^{-2}$) вклад «леса дислокаций» в упрочнение соизмерим с вкладом границ зерен при из размерах порядка 40...50 мкм. С увеличением плотности дислокаций роль «леса дислокаций» в упрочнение возрастает. Упрочнение за счет развития свободных дислокаций можно оценить выражением:

$$\Delta\sigma = \alpha G b \sqrt{\rho}, \qquad (7)$$

где $\alpha \approx 0{,}5$

Большеугловые границы зерен, являясь структурными двумерными дефектами, тормозят скольжение дислокаций, хотя одновременно являются и их источником. Решеточная дислокация, захваченная границей зерна и обладающая дальнедействующим полем напряжений, упруго отталкивает приближающую к ней другую решеточную дислокацию. Каждая следующая дислокация тормозится результирующим полем напряжений от ранее заблокированных дислокаций и поэтому сама останавливается на более далеком расстоянии от границы. Вклад в упрочнение большеугловых границ удовлетворительно описывается соотношением Холла-Петча:

$$\Delta\sigma_{\text{гр.з.}} = \frac{K_1}{\sqrt{D}}, \qquad (8)$$

где D – средний размер зерна.

При наличии субструктуры границы субзерен оказывают блокирующий эффект аналогичный межзеренным границам. Вклад этого механизма в упрочнение определяется зависимостью Ленгфорда-Коэна:

$$\Delta\sigma_{\text{суб.з.}} = \frac{K_2}{D^n}, \qquad (9)$$

где D – средний размер субзерна;
n – показатель степени, зависящий от материала и типа субструктуры.

Полигональные субграницы с малой разориентировкой в ряде случаев могут иметь для упрочнения большее значение, чем большеугловые, однако их образование связано со снижени-

ем плотности решеточных дислокаций, которые, компонуясь в стенки, обеспечивают переход от сплетенной дислокационной структуры клубкового типа к ячеистой и полигональной. При увеличении разориентировки влияние субграниц на прочность усиливается.

Итак, упрочнение металлов связывается с процессом наведения и взаимодействия в структуре различных дефектов кристаллического строения. Академиком А.А. Бочваром предложена обобщенная зависимость прочности металлов от плотности несовершенств их кристаллического строения. При отсутствии дефектов кристаллического строения прочность металла должна равняться теоретической, которая для процесса среза составляет

$$\sigma_{max} = \frac{G}{2\pi}. \qquad (10)$$

При появлении в кристалле несовершенств его прочность резко падает, достигая минимума, после которой вновь возрастает. Повышение прочности с увеличением плотности дефектов кристаллического строения начинается только тогда, когда между несовершенствами начинает проявляться взаимодействие. Все практически реализуемые технологии упрочнения располагаются на возрастающем участке обобщенной кривой.

Структурно-энергетический подход к оценке состояния металлических материалов подтверждает наличие корреляции между уровнем прочности и энергоемкостью кристаллической структуры. Любое несовершенство кристаллического строения рассматривается как аккумулятор упругой внутренней энергии, поэтому повышение плотности дефектов кристаллического строения приводит к увеличению внутренней энергии материала.

В деформационных технологиях упрочнения главная роль в обеспечении прочностных свойств отводится линейным дефектам кристаллического строения (дислокациям), а в технологиях легирования и модифицирования - взаимодействию дислокаций с точечными дефектами и дисперсными выделениями. Эксплуатационные прочностные свойства материала определяются не только плотностью дефектов кристаллического строения, но и их силовой и термической устойчивостью. Повышение термической и термомеханической стабильности достигается наведением высокоэнергетических линейных дефектов кристаллического строения, закрепленных посредством их взаимной блокировки в специальных дислокационных конфигурациях, взаимодействующих с ноль-мерными несовершенствами, дисперсными и дисперсионными выделениями [11; 12].

Устойчивость дислокационных конфигураций определяется степенью уравновешенности в микроструктуре полей дальнедействующих упругих напряжений. Наибольшей устойчивостью характеризуются дислокации, организованнее в субграницы и заблокированные растворенными атомами и сегрегациями. Затем следуют дислокации, заторможенные точечными дефектами и частицами дисперсных фаз. Наименьшей устойчивостью обладают плоские скопления дислокаций и индивидуальные дислокации внутри зерен [11–13].

Взаимодействие дислокаций между собой и точечными дефектами подчиняется фундаментальному термодинамическому принципу – стремлению системы к состоянию минимума свободной энергии. Энергия взаимодействия дислокаций с точечными несовершенствами кристаллического строения частично компенсирует энергию искажения кристаллической решетки, понижая свободную энергию всей микроструктурной системы. Уменьшение свободной энергии подчиняется термодинамическому соотношению:

$$\Delta F = \Delta U - E_f, \qquad (11)$$

где ΔF – изменение свободной энергии;
ΔU – изменение упругой энергии за счет наведения дислокаций;
E_f – энергии взаимодействия дислокаций с дефектами кристаллического строения.

Из (11) следует – чем больше энергия взаимодействия, тем ниже свободная энергия и более устойчива дислокационная структура. Взаимодействие дислокаций с дефектами кристаллического строения повышает их устойчивость. Скорость скольжения дислокации в общем случае описывается уравнением

$$\upsilon = \upsilon_0 \exp\left(\frac{U_0 + E_f - \gamma\tau}{kT}\right), \qquad (12)$$

где υ_0 – постоянная скорость, равная примерно одной десятой скорости звука;
U_0 – энергия активации движения дислокации;
E_f – энергия взаимодействия дислокации с другими дефектами кристалла;
γ – постоянная, зависящая от типа кристаллической решетки;
τ – действующее касательное напряжение.

С повышением энергии взаимодействия E_f возрастает приведенная энергия активации, что приводит к снижению скорости скольжения.

Вывод. Любой вид упрочнения металлов можно свести к единому процессу взаимодействия энергетических потоков какой-либо природы с материалом, инициирующих в нем структурные изменения, связанные с повышением плотности дефектов кристаллического строения.

Все известные на сегодняшний день энергетические воздействия были апробированы на предмет упрочнения, из которых многие реализовались в промышленных технологиях.

Степень упрочнения и эксплуатационные свойства образованных структур определяются величиной поглощенной внутренней энергии и стабильностью структурно-энергетических параметров материалу в процессе эксплуатации.

При совместном воздействии энергетического потока и потока активного вещества последние, вступая в физико-химическое взаимодействие с упрочняемым материалом, дополнительно повышают структурно-энергетические параметры модифицируемого материала внесением свободной энергии самим активным веществом и поглощением внутренней энергии за счет реакций смешения и образования новых соединений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адамсон А. Физическая химия поверхности / А. Адамсон. – М. : Мир, 1974. – 568 с.
2. Бахарев М. С. Структура и прочность материалов при лазерных воздействиях / М. С. Бахарев, Л. И. Миркин. – М. : Изд-во МГУ, 1988. – 224 с.
3. Журков С. Н. Кинетическая концепция прочности / С. Н. Журков // Вестник АН СССР. – 1968. – № 3. – С. 46–52.
4. Новиков И. И. Термодинамические аспекты пластического деформирования и разрушения металлов И. И. Новиков // Физико-механические и теплофизические свойства металлов. – М. : Наука, 1976. – С. 170–179.
5. Нотт Дж. Основы механики разрушения / Дж. Нотт. – М. : Металлургия, 1978. – 256 с.
6. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов : в 2-х томах / Я. Б. Фридман. – [3-е изд., доп. и перераб.]. – М., 1974. – Т. 1. – 800 с.
7. Хрущев М. М. Исследование изнашивания металлов / М. М. Хрущев, М. А. Бабичев. – М. : Изд-во АН СССР, 1960. – 352 с.
8. Кащеев В. Н. Процессы в зоне фрикционного контакта металлов / В. Н. Кащеев. – М. : Машиностроение, 1978. – 213 с.
9. Гаркунов Д. Н. Триботехника / Д. Н. Гаркунов. – М. : Машиностроение, 1985. – 424 с.
10. Лоладзе Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т. Н. Лоладзе. – М. : Машиностроение, 1982. – 320 с.
11. Гордиенко Л. К. Субструктурное упрочнение металлов и сплавов / Л. К. Гордиенко. – М. : Наука, 1973. – 224 с.
12. Роль дислокаций в процессах упрочнения и разрушения металлов / [В. С. Иванова, Л. К. Гордиенко, В. Н. Геминов и др.]. – М. : Наука, 1967. – 180 с.
13. Физическая мехомеханика и компьютерное моделирование материалов : в 2 томах / [В. Е. Панин, В. Е. Егорушкин, П. В. Макаров и др.]. – Новосибирск : Наука, 1995. – Т. 1. – 298 с. – Т. 2. – 320 с.

УДК 621.924.4

Абдулгазис Д. У., Якубов Ч. Ф.

ВОЗМОЖНОСТИ МИНИМИЗИРОВАННОЙ ПОДАЧИ К РЕЖУЩИМ КРОМКАМ СВЕРЛА МАСЛЯНЫХ СОТС С ЭНДОТЕРМИЧЕСКИМ ЭФФЕКТОМ

Пропонується схема внутрішньої мінімізованої подачі до ріжучих кромок свердла олійних мастильно-охолоджуючих технологічних засобів з присадками, які забезпечує додатковий ендотермічний ефект.

Ключові слова: *олійні МОТЗ, мінімізована подача, ріжучі кромки свердла.*

Предлагается схема внутренней минимизированной подачи к режущим кромкам сверла масляных СОТС с присадками, обеспечивающими дополнительный эндотермический эффект.

Ключевые слова: *масляные СОТС, минимизированная подача, режущие кромки сверла.*

Suggests scheme of the internal minimized serve to the cutting edges of drill of oils lubricating-cooling technology means with additives providing an additional endothermic effect.

Key words: *oily LCTM, minimized serve, cutting edges of drill.*

Постановка проблемы. Эксперименты по оценке эффективности масляных смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) растительного и минерального происхождения с присадками, обеспечивающими эндотермический эффект, подтвердили [1; 2] существенное улучшение показателей отвода тепла от лезвия режущего инструмента. Но наряду с положительным результатом, обеспечиваемым присадками к масляным СОТС в виде кристаллогидратов, обозначилась проблема ее длительной устойчивости как эмульсии (масло + кристаллогидрат).

Кристаллогидраты (соли) поставляются для промышленности и быта как достаточно крупнодисперсные порошки. Относительно высокая

их плотность в сравнении с плотностью растительных и минеральных масел, способствует расслоению СОТС как эмульсии. Это обстоятельство делает затруднительным использование для масляных СОТС присадок из кристаллогидратов без их диспергирования.

Присадки, обеспечивая эндотермический эффект, позволяют значительно уменьшить расход масляной СОТС порождают проблему ее подачи к режущим кромкам сверла. Тем более если необходимо выдерживать условия минимизации подачи СОТС.

Анализ литературы. Производственный опыт показывает, что если при обработке некоторых конструкционных материалов, например, серых чугунов, можно в широком диапазоне режимов обработки реализовать полностью «сухое» резание, то при таких операциях как сверление, развертывание и резьбонарезание по алюминиевым и магниевым сплавам для обеспечения надежности протекания процесса необходима дозированная подача СОТС. В противном случае, из-за забивания стружечных канавок существует высокая вероятность образования наростов, снижающих качество изделия и поломок инструмента.

Решением этой проблемы считают [3] дозированный подвод смазывающей среды. При дозированной подаче СОТС – это подвод воздушно-масляной смеси (аэрозоля).

В настоящее время совершенствуются и внедряются устройства и технологии, нацеленные на основательное уменьшение расхода традиционных СОТС. Конструкции современных систем позволяют подавать СОТС в минимально необходимом количестве, определяемом в каждом конкретном случае индивидуально. Эти устройства конструируются на основе трех основных принципов: оптимальном дозировании, целенаправленной подаче и качественной подготовке воздушно-масляной смеси [3].

В качестве смазочного материала в зависимости от типа режущего инструмента успешно применяются экологически безвредные растительные масла и спирты жирового ряда. При этом доставку смазочного материала в зону резания осуществляют в виде аэрозоля струей сжатого воздуха путем внешней либо внутренней подачи.

Главным препятствием применения внешней подачи является крайне ограниченная возможность доступа к лезвию режущего инструмента, в особенности при глубоком сверлении. Внутренняя подача масленой СОТС в рабочую зону в виде аэрозоля через тело самого инструмента, в нашем случае сверла, естественно более эффективна, чем внешний подвод.

Чем больше глубина сверления, тем тяжелее условия работы сверла, поскольку усложняется подача свежей СОТС в зону резания, увеличивается продолжительность соприкосновения образовавшейся стружки со стенками формирующегося отверстия [4].

Не смотря на высокие материальные затраты, технология минимального смазывания более осуществима путем внутренней подачи. Она исключает возможность рассеяния подаваемой в зону резания дозы СОТС, а также повышает стойкость инструмента даже на повышенных режимах.

Цель статьи – разработать систему минимизированной внутренней подачи к режущим кромкам сверла масленых СОТС с присадками, обеспечивающими дополнительный эндотермический теплоотвод.

Изложение основного материала. Известные системы внутренней минимизированной подачи масленых СОТС в зависимости от условий формирования воздушно-масляной среды разделяются на две схемы: с образованием смеси «смазочное вещество + воздух» вне вращающегося шпинделя (одноканальная схема) и с раздельным подводом смазочного вещества и воздуха к шпинделю с образованием аэрозоля в непосредственной близости от лезвия инструмента (двухканальная схема). Их принципиальные схемы приводятся в работе [3].

Поскольку сверлильные операции выполняются на относительно малых частотах вращения сверла, чем детали при обработке на токарных станках и в нашем случае не провоцируют эффект расслаивания аэрозолей, нами принята за основу одноканальная схема минимизированной подачи СОТС.

Известна система подачи аэрозолей на режущие кромки сверла, включающая аэрозольный генератор, соединенный впускными патрубками с резервуаром подачи СОТС и магистралью подачи сжатого воздуха, а выпускным патрубком – с внутренними каналами сверла [3]. Она позволяет подавать в зону резания аэрозоль в виде тумана или «спрея» (жидкие частицы в воздухе) с размерами частиц в пределах 0,001–1000 мкм.

Наша задача – ввести в масляный туман еще и твердую компоненту – диспергированный кристаллогидрат – и тем самым усилить теплоотвод от режущих кромок сверла со всеми положительными последствиями. Для решения поставленной задачи в описанную выше систему нами дополнительно вводится вихревая мельница, соединенная с бункером подачи кристаллогидрата (например, пищевой соды) и магистралью сжатого воздуха.

Принципиальная особенность предлагаемой системы – одновременное использование сжатого воздуха в качестве рабочего инструмента для помола кристаллогидрата и средства образования аэрозолей (твердые частицы в воздухе) в вихревой мельнице, а также аэрозольно-эмульсионной смеси (АЭС) с растительным маслом в смесительной камере струйного насоса для подачи образовавшейся композиции под давлением в каналы сверла.

Ниже представлены новые признаки предлагаемой системы:

- снабжение системы подачи АЭС на режущие кромки сверла вихревой мельницей, соединенной с бункером подачи кристалла гидрата и магистралью подачи сжатого воздуха, позволяющей скоростной струей воздуха измельчать кристаллогидрат и образовать из него аэрозоль;
- выполнение аэрозольного генератора в виде струйного насоса, смесительная камера которого соединена с вихревой мельницей и резервуаром подачи растительного масла, позволяющее образовывать АЭС из тонко помолотого кристаллогидрата, воздуха и масла;
- введение во внутрь патрубка подачи масла винтовой ленты обеспечило закручивание выходящей струи масла и эффективное его смешивание со струей смеси твердых частиц тонкого помола кристаллогидрата с воздухом (аэрозолем), за счет этого добиваться однородности состава АЭС.

В результате выше описанных признаков достигается достаточная текучесть смеси по подающим каналам системы, и наиболее эффективное охлаждение режущих кромок сверла. На рис. 1 приведена схема системы подачи АЭС на кромки сверла.

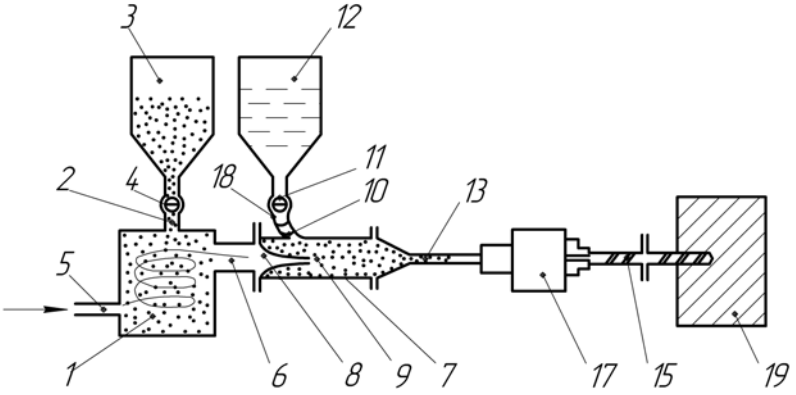


Рис. 1. Система подачи АЭС на кромки сверла.

На рис. 2 показана схема соединения вращающегося сверла с неподвижной камерой подачи АЭС.

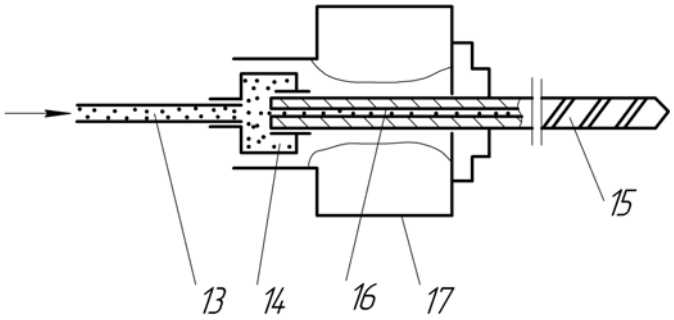


Рис. 2. Сверло с неподвижной камерой подачи АЭС.

Таким образом, представленная нами система подачи АЭС на режущие кромки сверла включает (см. рис. 1) вихревую мельницу 1, которая впускным патрубком соединена с бункером кристаллогидрата 3 через дозатор 4 и патрубок 5 подачи сжатого воздуха. Выпускным патрубком 6 вихревая мельница 1 соединена с аэрозольным генератором 7, выполненном в виде струйного насоса. Он состоит из конического насадка 8, установленного в камере смешивания 9 всасывающего патрубка 10, соединенного через дозатор 11 с резервуаром растительного масла 12.

Система подачи АЭС на режущие кромки сверла функционирует следующим образом. В вихревую мельницу из бункера через впускной патрубок с дозатором подают кристаллогидрат, а по второму патрубку – сжатый воздух. Вихревыми потоками сжатого воздуха кристаллогидрат измельчается до дисперсности от 1,0 до 10 мкм и в смеси с воздухом с большой скоростью через выпускной патрубок и конический наса-

док поступает в смесительную камеру аэрозольного генератора.

Одновременно из резервуара по патрубку с дозатором в смесительную камеру эжектируется растительное масло, раскручиваемое винтовой лентой, закрепленной на его внутренней поверхности. Вращающаяся струя масла подхватывается скоростным потоком аэрозольной смеси и образует однородную АЭС.

Полученная АЭС под давлением поступает в неподвижную кольцевую камеру (см. рис. 2), концентрично установленную на хвостовике вращающегося сверла, и через каналы в его стержне поступает к его режущим кромкам.

Под действием температуры в зоне сверления высокодисперсный кристаллогидрат дегидратирует с поглощением большого количества теплоты, которая отбирается из зоны резания.

При минимизированной подаче АЭС ее расход составляет 5…10 мл/мин., поэтому стружка удаляется как сухая содержания масла стружки, направляемый на переплавку при правильной наладке подающей системы не превышает допустимого значения 0,3%.

Выводы. Технология минимизированной подачи к режущим кромкам сверла масляных СОТС с присадками, обеспечивающими дополнительный эндотермический эффект, осуществима.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдулгазис Д. У. Использование эндотермического эффекта дегидрации кристаллогидратов для повышения теплоотводящей способности СОТС на основе растительных масел / Д. У. Абдулгазис // Высокие технологии в машиностроении. – Харків, 2005. – Вип. 2 (11). – С. 3–8.
2. Абдулгазис Д. У. Повышение теплоотводящей способности и устойчивости к окислению СОТС на основе растительных масел / Д. У. Абдулгазис, Ф. Я. Якубов, У. А. Абдулгазис // Резание и инструмент в технологических системах : международный научно-технический сборник НТУ «ХПИ». – Харьков, 2003. – Вып. 65. – С. 3–10.
3. Якубов Ч. Ф. Упрочняющее действие СОТС при обработке металлов резанием : монография / Ч. Ф. Якубов. – Симферополь : ОАО «Симферопольская городская типография», 2008. – 156 с.
4. Марков В. В. Повышение эффективности и экологической безопасности лезвийного резания путем применения энергетической активации и оптимизации состава присадок СОТС : дис. … докт. техн. наук : 05.03.01 / Марков Владимир Викторович. – Иваново, 2004. – 407 с.

УДК 621.7

Доброскок В. Л., Абдурайимов Л. Н., Чернышов С. И.

РАЦИОНАЛЬНАЯ ОРИЕНТАЦИЯ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ИХ ПОСЛОЙНОМ ФОРМООБРАЗОВАНИИ НА БАЗЕ ИСХОДНОЙ ТРИАНГУЛЯЦИОННОЙ 3D МОДЕЛИ

Розглянуто підхід раціональної орієнтації виробів у просторі при їхньому пошаровому виготовленні на базі вихідної тріангуляційної 3D моделі. Для підвищення точності формоутворення й зменшення припуску під остаточну обробку орієнтація виробів визначається на підставі розрахункових залежностей, що враховують кути, утворені між їхніми складовими поверхнями й напрямком побудови. Приведено приклади застосування пропонованого підходу при побудові виробів технологіями прискореного формоутворення.

Ключові слова: *технологія прискореного формоутворення, пошарова побудова, тріангуляційна модель, STL-файл.*

Рассмотрен подход к рациональной ориентации изделий в пространстве при их послойном изготовлении на базе исходной триангуляционной 3D модели. Для повышения точности формообразования и уменьшения припуска под окончательную обработку ориентация изделий определяется на основании расчетных зависимостей, учитывающих углы, образованные между их составляющими поверхностями и направлением построения. Приведены примеры применения предлагаемого подхода при построении изделий технологиями ускоренного формообразования.

Ключевые слова: *технология ускоренного формообразования, послойное построение, триангуляционная модель, STL-файл.*

The approach of rational orientation of products in space at their layer-by-layer manufacturing on basis of the initial triangulation 3D model is considered in this article. To improve the accuracy of formation and reduction of allowance for final processing the orientation of items is determined on the basis of theoretical relations, which consider the angles formed between the components of their surfaces and the building direction. Examples of application of the offered approach are given at building products by technology accelerates product formation.

Key words: *technology of accelerated formation, layer-y-layer building, triangulation model, STL-file.*

Постановка проблемы. Ускоренное формообразование изделий относится к новым технологиям, позволяющим материализовать физические объекты на основе геометрических данных, не прибегая к использованию традиционных инструментов. Основным преимуществом таких технологий является отсутствие принципиальных ограничений на уровень сложности формообразующих поверхностей изделия. Одним из основных требований при изготовлении определенного изделия является наличие информации о поперечных сечениях его модели [1; 2].

Послойные методы формообразования предполагают прямой переход от виртуальной 3D CAD модели к создаваемому объекту. При данных методах 3D CAD модель изделия последовательно рассекается на серию достаточно тонких слоев, обычно 0,025÷0,2 мм толщиной, с некоторым дискретно заданным шагом построения. Толщина слоя определяется технологическими возможностями применяемой установки и требуемой точностью материализации. Точность и эффективность процесса послойного построения изделий зависит не только от толщины создаваемых слоев материала, но и от того, как они располагаются на рабочей платформе установки ускоренного формообразования.

От выбранной ориентации изделия в рабочей камере будет зависеть точность формирования поверхностей, технологическое время изготовления и необходимость использования поддерживающих элементов. Поверхности изделия, наклонные относительно направления построения, будут иметь ступенчатую форму. Более высокая точность изготовления изделий может быть достигнута для поверхностей, перпендикулярных или параллельных направлению построения.

Анализ литературы. Известны методы послойного построения изделий на установках ускоренного формообразования, при которых изготовление ведется путем последовательного неразъемного соединения элементарных слоев объема материала, в качестве которого могут выступать полимер, керамика, бумага, металл и др. [3–12].

Задаче выбора рациональной ориентации изделий на рабочей платформе установки ускоренного формообразования посвящено достаточное количество работ [13–31].

В качестве различных критериев оптимизации выступают такие показатели, как точность, качество поверхности, объем поддерживающих элементов и стоимость изготовления. Часть из них [14; 15; 20–22; 31] относятся к процессам лазерной стереолитографии (SLA), остальные [13; 23; 25; 29; 30] посвящены процессам избирательного лазерного спекания (SLS), моделирования оплавлением (FDM) и др.

В работе [28] рассматривается подход, при котором этапу построения изделий послойными методами предшествует их предварительная ориентация на рабочей платформе установки. Для этого применяется специальная статистическая модель шероховатости поверхности изделия. Модель построена на базе экспериментальных данных для толщины слоя $h \approx 0{,}15$ мм (0,006 дюйма) и используется для определения погрешности формы материализованного изделия по триангуляционной STL модели.

Погрешности вычисляются для всех элементов триангуляционной модели, с последующим определением среднего значения шероховатости для всей поверхности изделия. Далее вводится специальная целевая функция, значения которой рассчитываются для различных вариантов ориентации изделия. Минимизация целевой функции осуществляется на основе метода доверительной области (Trust region method [16]) с использованием математического пакета Matlab 6.5.

Существенным недостатком рассмотренного подхода является инкапсулированность вычислительных процедур минимизации целевой функции, а также то, что статистическая модель шероховатости поверхности модели построена для одного значения толщины слоя.

При изменении шага построения модель будет не вполне корректной, а ее применение приведет к возникновению существенных погрешностей построения. Указанные недостатки в совокупности ведут к увеличению технологического времени изготовления изделий за счет необходимости выполнения подготовительных операций, связанных с возможным построением новых статистических моделей, что снижает производительность процесса изготовления изделий в целом.

Цель данной **статьи** – предложить использование предварительной ориентации изделий при их послойном изготовлении и повышение точности формообразования.

Изложение основного материала. Твердотельные модели в системах 3D CAD моделирования строятся на основе базовых объектов (примитивов), а результирующая поверхность изделия представляет собой их комбинацию на базе булевых операций.

В процессе выполнения исследований была предложена рабочая гипотеза о том, что наиболее высокая достижимая точность формообразования при послойном построении изделий на базе исходной триангуляционной 3D модели мо-

жет быть получена путем рациональной ориентации их на платформе установки. Эта гипотеза справедлива для изделий, формообразующие поверхности которых относятся к относительно простым (плоскости, цилиндрические поверхности и их комбинации).

С целью повышения точности формообразования и производительности процесса изготовления каждое отдельное изделие необходимо ориентировать на платформе таким образом, чтобы сумма площадей треугольников триангуляционной модели, нормали которых перпендикулярны или параллельны направлению построения изделия, была максимальной. Математическое описание условия рациональной ориентации изделия на платформе имеет следующий вид:

$$F = \max_{\substack{1 \le j_x \le m_x \\ 1 \le j_y \le m_y \\ 1 \le j_z \le m_z}} \left(\sum_{1 \le i \le n} Q_i \right), \qquad (1)$$

где m_x, m_y, m_z – число j_x, j_y, j_z вариантов ориентации изделия на рабочей платформе относительно осей координат OX, OY, OZ соответственно;

n – общее количество i-х треугольников в триангуляционной модели изделия;

Q_i – площадь i-го треугольника при (j_x, j_y, j_z) варианте ориентации изделия в случае перпендикулярности или параллельности его нормали относительно вектора направления построения.

Площадь Q_i определяется с одновременным учетом ориентации каждого треугольника по следующей зависимости:

$$Q_i = \begin{cases} S_i, & \text{если} \left(\widehat{\vec{N}_i, \vec{Z}} \right) \in \left(0 \pm \cos(\Delta\phi) \right) \text{или} \left(-1 \pm \cos(\Delta\phi) \right) \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, \qquad (2)$$

где S_i – площадь i-го треугольника, нормаль которого образует с вектором построения изделия углы в диапазонах, составляющих $\pi/2 \pm \Delta\phi$ или $\pi \pm \Delta\phi$;

$\vec{N}_i$ – единичный нормальный вектор i-го треугольника триангуляционной модели;

$\vec{Z}$ – единичный вектор направления построения изделия;

$\Delta\phi$ – шаг дискретизации угла поворота изделия относительно осей координат.

Общее количество треугольников n определяется по исходной STL модели изделия. В свою очередь, общее количество вариантов ориентации изделия m относительно осей координат определяется как $m = m_x m_y m_z = (1 + \pi/\Delta\phi)^3$.

Проведенные исследования показали, что рациональные значения шага дискретизации угла поворота $\Delta\phi$ находятся в интервале $\Delta\phi = \pi/20 \div \pi/10$. Углы поворота изделия относительно осей координат на каждом шаге находятся по формулам:

$$\begin{aligned} \phi_{x(j_x)} &= \phi_{x(j_x-1)} + \Delta\phi, \ 1 \le j_x \le m_x; \\ \phi_{y(j_y)} &= \phi_{y(j_y-1)} + \Delta\phi, \ 1 \le j_y \le m_y; \\ \phi_{z(j_z)} &= \phi_{z(j_z-1)} + \Delta\phi, \ 1 \le j_z \le m_z. \end{aligned} \qquad (3)$$

При этом новые значения углов поворота изделия на каждом следующем шаге определяются на основе прежних.

Для нахождения значений Q_i необходимо вычислять скалярные произведения векторов: нормалей треугольников в триангуляционной модели и вектором направления построения изделия. При вычислении скалярных произведений требуется определять углы между векторами. Для общего случая значения этих углов могут быть рассчитаны по следующей зависимости [1]:

$$\varphi_i = \arccos\left(\frac{\vec{N}_i \vec{Z}}{\left|\vec{N}_i\right| \times \left|\vec{Z}\right|} \right) = \arccos\left(\frac{N_{xi} Z_x + N_{yi} Z_y + N_{zi} Z_z}{\sqrt{N_{xi}^2 + N_{yi}^2} \times \sqrt{Z_x^2 + Z_y^2} + Z_x^2} \right), \qquad (4)$$

где $\vec{N}_i$ – единичный нормальный вектор i-го треугольника триангуляционной модели изделия с координатами $\{N_{ix}, N_{iy}, N_{iz}\}$;

$\vec{Z}$ – единичный вектор направления построения изделия с координатами $\{Z_x, Z_y, Z_z\}$.

Для рассматриваемого случая, приведенные в (4) векторы имеют единичную длину. Вектор направления построения изделия совпадает с положительным направлением оси координат OZ, т. е. координаты вектора $\vec{Z}$ будут {0, 0, 1}. Тогда зависимость (4) преобразуется к следующему виду:

$$\varphi_i = \arccos\left(\widehat{\vec{N}_i, \vec{Z}} \right) = \arccos\left(N_{iz} \right). \qquad (5)$$

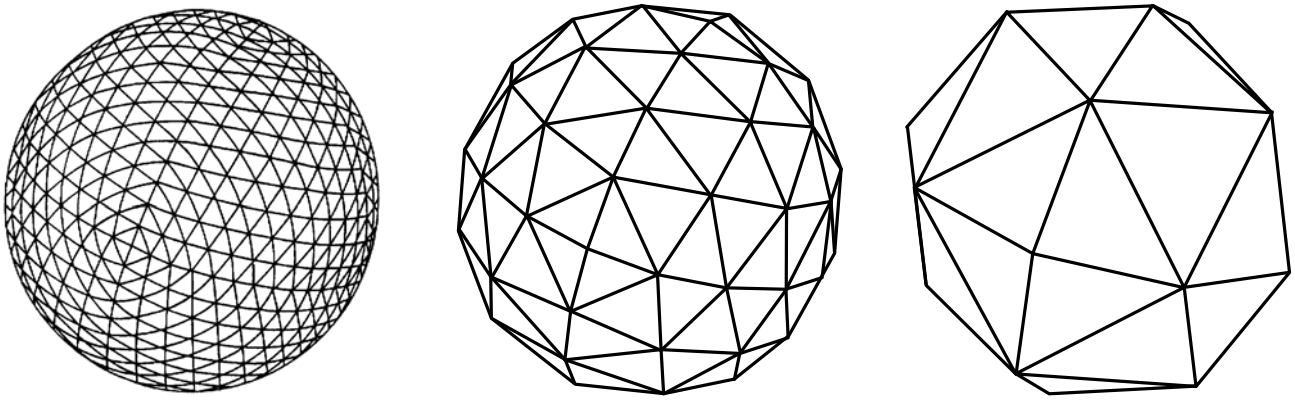
Таким образом, косинус угла между векторами равен направляющему косинусу по оси OZ вектора направления построения изделия. Определение площадей треугольников STL модели производится только в случае, когда рассматриваемые углы φ_i лежат в диапазоне $\pi/2 \pm \Delta\phi$ или $\pi \pm \Delta\phi$. На основе вычисленных углов и площадей рассматриваемых треугольников рассчитывается значение функционала (1) при текущей ориентации изделия. Вместе со значением функционала сохраняются также текущие углы поворота изделия ($\phi_{x(j_x)}, \phi_{y(j_y)}, \phi_{z(j_z)}$). На следующем этапе рассчитываются новые значения углов поворота относительно осей координат по

формуле (3), и изделие ориентируется соответствующим образом. Далее вычисленное значение функционала (1) сравнивается со значением, полученным на предыдущем шаге. В случае если новое значение больше прежнего, то новые углы поворота изделия сохраняются. Процесс продолжается для всех возможных вариантов ориентации изделия. В конечном итоге значениям рациональной ориентации изделия будут соответствовать результирующие углы его поворота относительно осей координат.

Рассмотрим применение предлагаемого подхода послойного построения изделий на основе триангуляционной 3D модели сферы, которая представляет собой систему из достаточно большого количества треугольников.

В данном случае точность STL модели зависит от количества треугольников, описывающих 3D тело.

На рис. 1 изображена модель сферы, аппроксимированная различным количеством треугольников: 1450, 450, 67.



1450 треугольников 450 треугольников 67 треугольников

Рис. 1. Аппроксимация модели сферы различным числом треугольников.

При передаче геометрической модели между CAD системами или сохранении данных о триангуляционной 3D модели изделия часть информации может теряться, например, топологическая информация о взаимосвязях между элементами и др.

Эта информация может быть вновь сгенерирована с использованием компьютерной техники, но требуется дополнительное время. Вычислительные мощности современной техники достаточны для обработки больших объемов данных. Рассмотрим единичный элемент триангуляционной модели сферы, аппроксимированной 67 треугольниками (см. рис. 1).

На рис. 2 изображен *i*-й треугольник, угол φ_i между его нормальным вектором $\vec{N}_i$ и направлением построения изделия $\vec{Z}$. Для данного случая направление построения изделия совпадает с положительным направлением оси *OZ*.

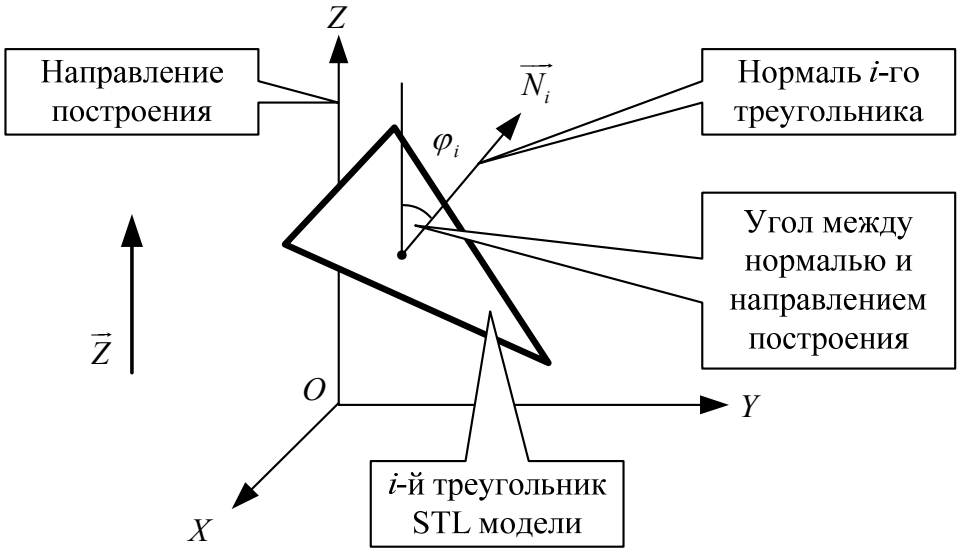


Рис. 2. Угол между нормальным вектором треугольника и направлением построения изделия.

Расчетная схема определения угла φ_i между нормальным вектором треугольника $\vec{N}_i$ и направлением построения изделия $\vec{Z}$ представлена на рис. 3. Приведена исходная поверхность изделия, поверхность i-го и i-1 треугольников триангуляционной модели, нормаль $\vec{N}_i$ к ее поверхности, угол φ_i, две секущие плоскости с координатами Z_{i-1} и Z_i соответственно.

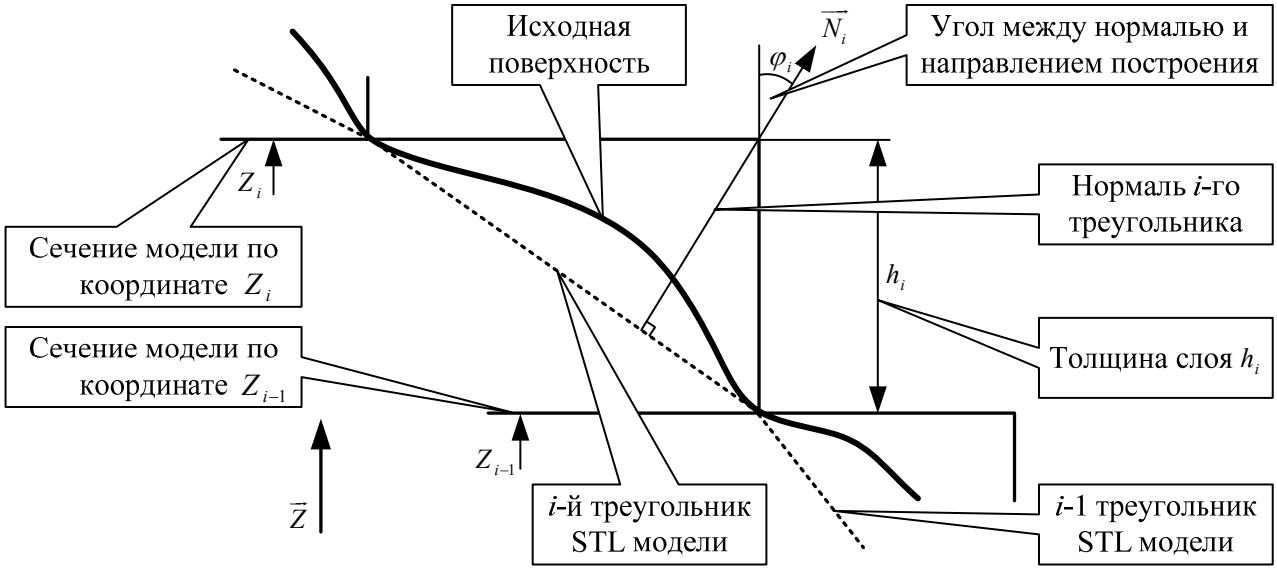


Рис. 3. Расчетная схема определения угла между нормальным вектором треугольника и направлением построения изделия.

На рис. 4 представлена триангуляционная модель изделия, состоящая из 10 граней. Каждая грань изделия разбита на соответствующее число треугольников. Информация об этих треугольниках берется из исходного STL-файла и используется для дальнейшего определения рациональной ориентации изделия. На основе заданного шага дискретизации угла поворота изделия относительно осей координат осуществляется его ориентация на рабочей платформе с последующим выбором наиболее рационального варианта.

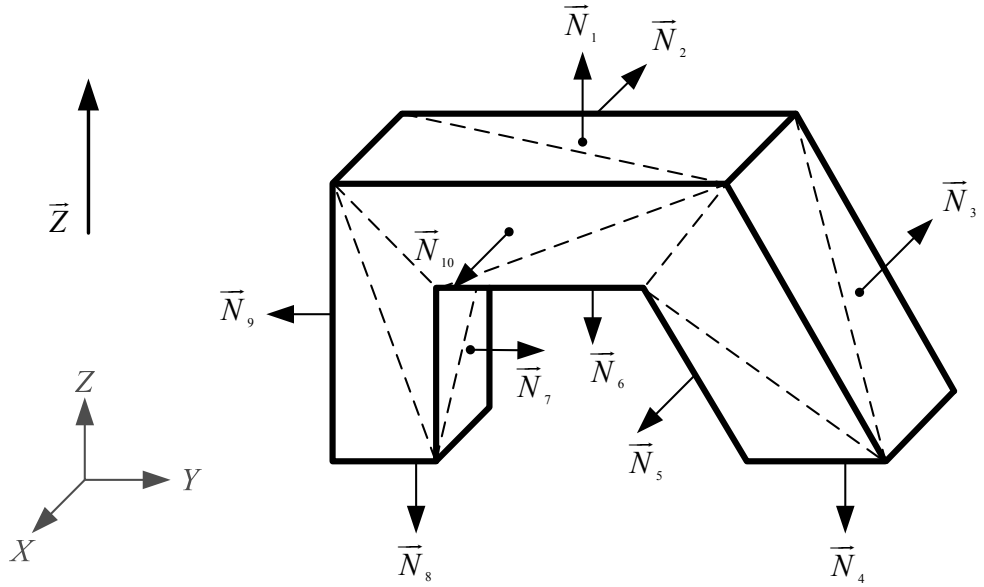


Рис. 4. Триангуляционная модель изделия, состоящая из 10 граней, и нормалей к ним.

Изделие, изображенное на рис. 4, относится к относительно простым. Формообразующие поверхности такого изделия строятся на основе базового объекта – плоскости. Для данного случая рациональная ориентация изделия будет соответствовать повороту относительно оси OY на углы $\phi_y = -\pi/2$ или $\phi_y = \pi/2$. При этом площадь треугольников, нормали которых перпендикулярны вектору направления построения изделия, будет максимальной. Необходимость в поддер-

живающих элементах для данного случая отсутствует.

Примеры использования предложенного подхода для реальных изделий представлены на рис. 6–8. В первом примере рассмотрим корпус опоры, изображенный на рис. 6*а*, с габаритными размерами по осям координат 69,850 × 241,300 × 141,163 мм. Данный подход не учитывает в качестве критерия оптимизации минимизацию технологического времени изготовления изделий. В результате применения предлагаемого подхода корпус опоры будет рационально ориентирован следующим образом (рис. 6*б*) с углами его поворота относительно осей координат *XYZ*: $\phi_x = \pi/2$, $\phi_y = \pi/2$ и $\phi_z = 0$.

При данной ориентации изделие будет иметь максимальную площадь поверхности основания, перпендикулярную вектору направления построения.

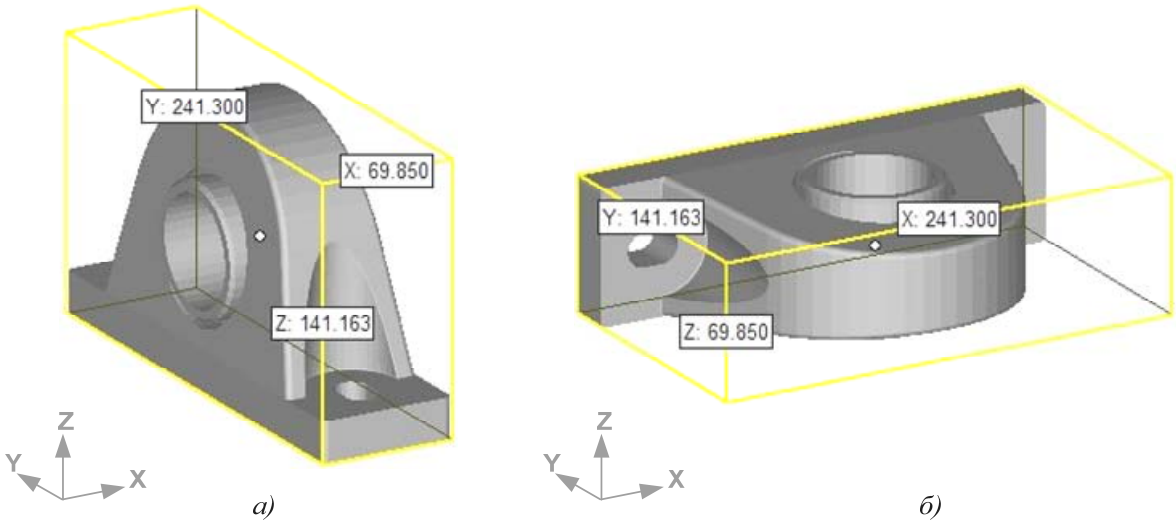


Рис. 6. 3D модель корпуса опоры для осуществления предлагаемого подхода послойного изготовления (*а* – исходная ориентация, *б* – результирующая ориентация).

Результирующая ориентация изделия после поворотов относительно осей координат приведет также и к уменьшению технологического времени формообразования.

Во втором примере представлен корпус, изображенный на рис. 7*а*, с габаритными размерами по осям координат 497,840 × 368,300 × 254,000 мм.

В результате применения предложенного подхода корпус будет рационально ориентирован таким образом (рис. 7*б*), чтобы получить наиболее высокую достижимую точность изготовления. При этом углы поворота изделия относительно осей координат *XYZ* будут следующие: $\phi_x = \pi/2$, $\phi_y = \pi/2$ и $\phi_z = 0$.

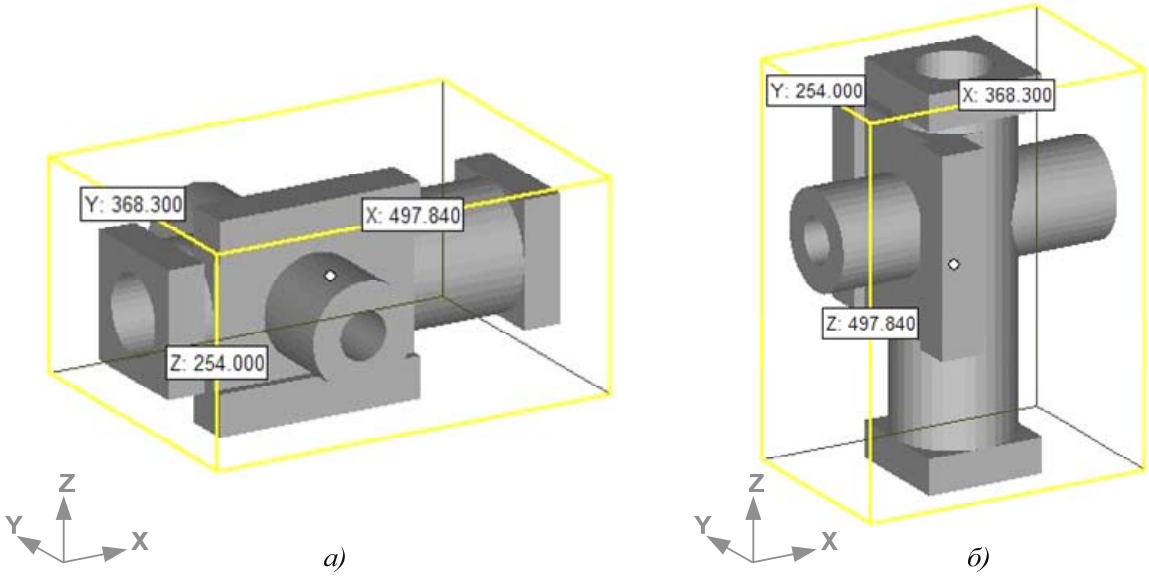


Рис. 7. 3D модель корпуса для осуществления предлагаемого подхода послойного изготовления (*а* – исходная ориентация, *б* – результирующая ориентация).

Технологическое время изготовления изделия в этом примере на базе результирующей ориентации будет больше относительно ее исходной ориентации. Это связано с тем, что преобладающая поверхность в изделии имеет цилиндрическую форму. Более высокая точность формообразования такого изделия возможна в том случае, когда нормали треугольников, описывающих боковую поверхность цилиндрической части, были перпендикулярны направлению построения.

В третьем примере представлен кронштейн, изображенный на рис. 8*а*, с габаритными размерами по осям координат 114,300 × 76,200 × 93,662 мм. В результате применения предложенного подхода кронштейн будет ориентирован рациональным образом (рис. 8*б*). При этом углы поворота изделия относительно осей координат *XYZ* будут следующие: $\phi_x = \pi/2$, $\phi_y = \pi/2$ и $\phi_z = \pi$.

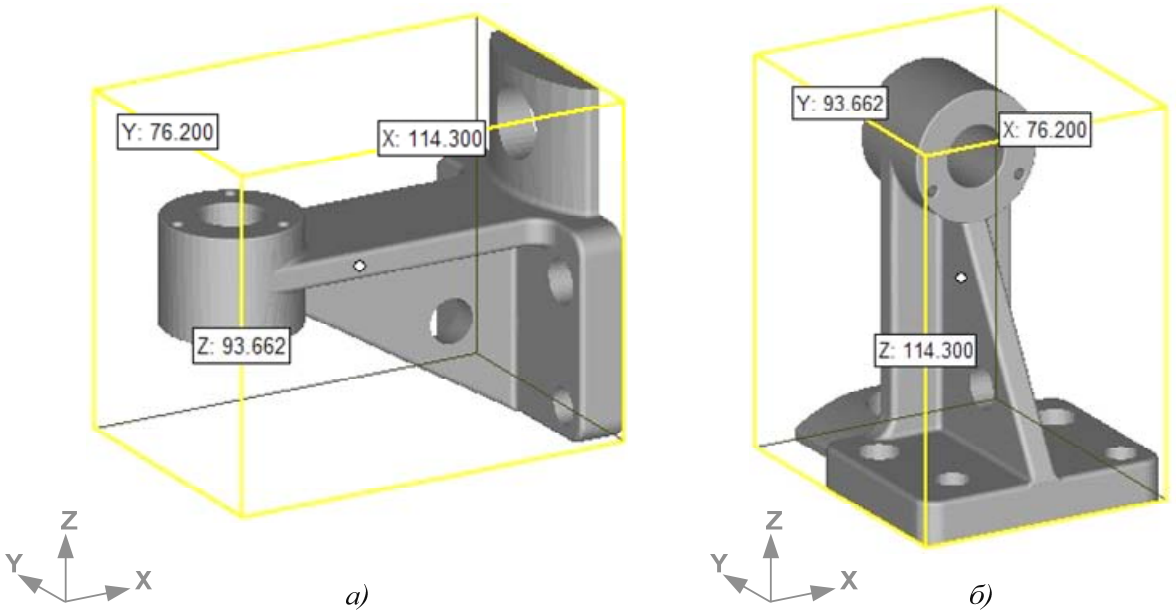


Рис. 8. 3D модель кронштейна для осуществления предлагаемого подхода послойного изготовления (*а* – исходная ориентация, *б* – результирующая ориентация).

Исходная ориентация изделия, как видно из рисунка, требует при построении методом лазерной стереолитографии наличие обязательных поддерживающих элементов. При результирующей ориентации изделия плоскость основания будет располагаться перпендикулярно направлению построения, что исключает применение поддерживающих элементов.

Выводы.

1. Выполненные исследования позволили выявить особенности рациональной ориентации изделий на платформе при их послойном изготовлении. Практической ценностью является возможность получения наиболее высокой достижимой точности формообразования изделий на базе исходной триангуляционной 3D модели.

2. Выявлено, что при осуществлении поворота изделия относительно осей координат возможно получение такой его ориентации, при которой будет минимизирована ступенчатость поверхностей. Это достигается за счет максимизации площадей поверхностей перпендикулярных или параллельных вектору направления построения изделия.

3. На базе модельных экспериментов подтверждена необходимость предварительной рациональной ориентации изделий на рабочей платформе. Выбор должен производиться на этапе, предшествующем материализации изделий.

4. Возможность выбора рациональной ориентации изделий на рабочей платформе реализована в специальном программном обеспечении. С его помощью можно определить наиболее рациональную ориентацию изделия на основе заданного шага дискретизации угла поворота относительно осей координат.

5. Предложенный подход является одним из возможных вариантов по выбору рациональной ориентации изделий при их послойном изготовлении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Интегрированные технологии ускоренного прототипирования и изготовления : монография / [Л. Л. Товажнянский, А. И. Грабченко, С. И. Чернышов и др.] ; под ред. Л. Л. Товажнянского, А. И. Грабченко. – [2-е изд.]. – Харьков : ОАО «Модель Вселенной», 2005. – 224 с.

2. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / К. Ли. – СПб. : ПИТЕР, 2004. – 560 с.
3. Пат. 4863538 США, МПК B 27 N 3/00, B 32 B 31/00, B 23 K 9/00, B 29 C 67/00. Method and apparatus for producing parts by selective sintering / Carl R. Deckard; Board of Regents, The University of Texas System. – № 920580 ; filed 17.10.1986 ; date of print 05.09.1989.
4. Пат. 5015424 США, МПК B 29 C 35/08. Methods and apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography / Dennis R. Smalley; 3D Systems Inc. – № 183015 ; filed 18.04.1988 ; date of print 14.05.1991.
5. Пат. 5130064 США, МПК B 29 C 35/08, B 29 C 41/02, B 29 C 41/52. Method of making a three dimensional object by stereolithography / Dennis R. Smalley, Charles W. Hull; 3D Systems Inc. – № 429435 ; filed 30.10.1989 ; date of print 14.07.1992.
6. Пат. 5141680 США, МПК B 29 C 35/08, B 29 C 41/02, B 29 C 41/36. Thermal stereolithography / Thomas A. Almquist, Dennis R. Smalley; 3D Systems Inc. – № 592559 ; filed 04.10.1990 ; date of print 25.08.1992.
7. Пат. 5184307 США, МПК G 06 F 15/46, B 29 C 35/08, B 29 C 67/00. Method and apparatus for production of high resolution three-dimensional objects by stereolithography / Charles W. Hul, Stuart T. Spense, David J. Albert and other; 3D Systems, Inc. – № 331644 ; filed 31.03.1989 ; date of print 02.02.1993.
8. Пат. 5247180 США, МПК B 29 C 35/08. Stereolithographic apparatus and method of use / Larry D. Mitcham, William E. Nelson; Texas Instruments Incorporated. – № 814859 ; filed 30.12.1991 ; date of print 21.09.1993.
9. Пат. 5437964 США, МПК G 03 C 5/00, G 03 C 1/725, G 08 F 2/46. Stereolithography using vinyl ether-epoxide polymers / Stephen C. Lapin, James R. Snyder, Eugene V. Sitzmann and other; Allied-Signal Inc. – № 201146 ; filed 24.02.1994 ; date of print 01.08.1995.
10. Пат. 5663883 США, МПК G 06 F 19/00. Rapid prototyping method / Charles L. Thomas, Zetain Wang; University of Utah Research Foundation. – № 517092 ; filed 21.08.1995 ; date of print 02.09.1997.
11. Пат. 5902538 США, МПК B 29 C 35/08, B 29 C 41/02. Simplified stereolithographic object formation methods of overcoming minimum recoating depth limitations / Theodor R. Kruges, Chris R. Manners, Hop D. Hguyen; 3D Systems, Incorporation. – № 08/920428 ; filed 29.08.1997 ; date of print 11.05.1999.
12. Пат. 6600965 B1 США, МПК G 06 F 19/00. Method and apparatus for production of high resolution three-dimensional objects by stereolithography / Charles W. Hull, Stuart T. Spence, David J. Albert and other; 3D Systems Inc. – № 09/236259 ; filed 26.01.1999 ; date of print 29.07.2003.
13. Alexander P. Part orientation and build cost determination in layered manufacturing / P. Alexander, S. Allen, D. Dutta // Computer Aided Design. – 1998. – Vol. 30. – №. 5. – P. 343–356.
14. Bablani M. Quantification of errors in rapid prototyping processes and determination of preferred orientation of parts / M. Bablani, A. Bagchi // Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME. – 1995. – Vol. 23. – P. 319–324.
15. Cheng W. Multi-objective optimization of part-building orientation in stereolithography / W. Cheng, J. Y. H. Fuh, A. Y. C. Nee, Y. S. Wong, H. T. Loh, T. Miyazawa // Rapid Prototyping J. – 1995. – Vol. 1. – № 4. – P. 12–23.
16. Conn A. R. Trust-region methods / Andrew R. Conn, Nicholas I. M. Gould, Philippe L. Toint. – Philadelphia : Society for Industrial Mathematics, 2000. – 979 p.
17. Frank D. Expert system-based selection of the preferred direction of build for rapid prototyping processes / D. Frank, G. Fadel // J. of Intelligent Manuf. – 1995. – №. 6. – P. 339–345.
18. Hong S. Byun. Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing / Hong S. Byun, Kwan H. Lee // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2006. – №. 28. – P. 307–313.
19. Hong S. Byun. Optimal part orientation of rapid prototyping using a genetic algorithm / Hong S. Byun, Kwan H. Lee // Computers & Industrial Engineering. – 2004. – P. 426–431.
20. Hur J. The development of a CAD environment to determine the preferred build-up direction for layered manufacturing / J. Hur, K. Lee // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 1998. – №. 14. – P. 247–254.
21. Kim J. Y. C. Determination of optimal part orientation in stereolithographic rapid prototyping / J. Y. Kim, K. Lee, J.C. Park // Technical Report, Department of Mechanical Design and Production Engineering. – Seoul : Seoul National University. – 1994.
22. Lan P.T. Determining fabrication orientations for rapid prototyping with stereolithography apparatus / S. Y. Chou, L. L. Chent, D. Gemmill // Computer-Aided Design. – 1997. – Vol. 29. – № 1. – P. 53–62.
23. Massod S. H. A generic algorithm for part orientation system for complex parts in rapid prototyping / S. H. Massod, W. Rattanawong, P. Iovenitti // J. Mater. Process. Technol. – 2003. – Vol. 139. – № 1–3. – P. 110–116.
24. Masood S. H. A generic part orientation system based on volumetric error in rapid prototyping / S. H. Masood, W. Rattanawong // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2002. – № 19. – P. 209–216.
25. Pandey P. M. Optimal part deposition orientation in FDM by using a multi-criteria Genetic Algorithm/ P. M. Pandey, K. Thrimurtullu, N. V. Reddy // Int. J. of Production Research. – 2004. – Vol. 42. – No. 19. – P. 4069–4089.
26. Pham D. T. Part orientation in stereolithography / D. T. Pham, S. S. Dimov, R. S. Gault // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 1999. – № 15. – P. 674–682.
27. Satyandra K. Gupta. Finding near-optimal build orientations for shape deposition manufacturing / Satyandra K. Gupta, Qi Tian, Lee E. Weiss // Proceedings of the IFIP TC5 WG5.3 Int. Conf. on Sculptured Surface Machining. – 1998. – Vol. 146. – P. 208–216.

28. Optimum part deposition orientation in stereolithography / S. K. Singhal, A. P. Pandey, P. M. Pandey, A. K. Nagpal // Computer-Aided Design & Applications. – 2005. – Vol. 2. – Nos. 1–4. – P. 319–328.
29. Thompson D.C. Optimizing part quality with orientation / D. C. Thompson, R. H. Crawford // Proc. of the Solid Freeform Fabrication Symposium. – 1995. – Vol. 6. – P. 362–368.
30. Thrimurtullu K. Optimal part deposition orientation in fused deposition modeling / K. Thrimurtullu, P. M. Pandey, N. V. Reddy // Int. J. of Machine Tools and Manufacture. – 2003. – Vol. 44. – №. 6. – P. 585–594.
31. Optimal orientation with variable slicing in stereolithography / F. Xu, Y. S. Wong, H. T. Loh, J.Y.H. Fuh, T. Miyazawa // Rapid Prototyping J. – 1997. – Vol. 3. – № 3. – P. 76–88.
32. Дьяконов В. П. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6. Основы применения / В. П. Дьяконов. – М. : СОЛОН-Пресс, 2005. – 800 с.

УДК 621.923.5

Иззетов Н. А., Османов Э. Р.

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ

У статті представлений аналіз існуючих методів обробки точних глибоких отворів та факторів, що впливають на формування точності та продуктивності обробки. Виявлені основні шляхи удосконалення процесів фінішної обробки точних глибоких отворів.

Ключеві слова: *хонінгування, зенкування, глибоке свердління, овальність, припуск, точність, фінішна операція.*

В статье представлен анализ существующих методов обработки точных глубоких отверстий и факторов, влияющих на формирование точности и продуктивности обработки. Определены основные пути совершенствования процессов финишной обработки точных глубоких отверстий.

Ключевые слова: *хонингование, зенкерование, глубокое сверление, овальность, припуск, точность, финишная операция.*

In the article are presented analysis of the exist methods of the treatment of the precise deep orifices, and the factors that influence on the forming of the precision and the productivity of the treatment. The basic ways of the processes perfection of the finishing treatment of the precise deep orifices are determined.

Keywords: *honing, reaming, deep drilling, ovality, allowance, accuracy, and finishing operations.*

Постановка проблемы. Изготовление глубоких отверстий, особенно малых диаметров повышенной относительной длины, связано с большими технологическими трудностями, которые существенно возрастают с уменьшением диаметра обработки, увеличением относительной длины отверстия и повышением прочностных характеристик обрабатываемого материала заготовки. При этом наибольшие трудности возникают при выполнении финишной операции глубоких отверстий после предшествующих операций зенкерования или глубокого сверления.

Анализ литературы показывает, что процессы обработки отверстий зенкерованием и сверлением с относительной длиной 50 и более раз имеют свои особенности, которые приводят к ограничению производительности обработки и к снижению качественных показателей обработанных отверстий.

К таким особенностям относятся низкая изгибная, крутильная и продольная жёсткость применяемого инструмента, низкая изгибная жёсткость заготовок и значительные величины непрямолинейности их оси, достигаемые до 4,0 мм, высокие частоты вращения шпинделя (до 2000 об./мин.), а также трудности удаления стружки из зоны обработки [1].

Таким образом, полученные заготовки деталей с глубокими отверстиями имеют неравномерность припуска по диаметру для снятия на финишной операции в пределах до 0,15…0,20 мм на длине 1000 мм, кривизну оси отверстия до 2,5…4,0 мм на длине 1000 мм, отклонение от круглости до 0,4…0,5 мм в различных сечениях по всей длине отверстия, конусность 0,6...0,7 мм на длине 1000 мм.

Исходя из вышеуказанных причин, финишная обработка точных глубоких отверстий с относительной длиной 50 и выше раз шлифованием практически невозможна из-за чрезмерно низкой жёсткости шлифовальной оправки и высокой трудоемкости установки заготовки на шлифовальном оборудовании. Поэтому наиболее эффективным методом финишной обработки глубоких отверстий для обеспечения высокой точности и чистоты обработанной поверхности принят процесс алмазного хонингования, который выполняется при значительно малых скоростях резания, а также низких температурных и силовых режимах обработки.

Основным условием получения заданной геометрической точности глубоких отверстий, при хонинговании является обеспечение в конструкциях хонголовки и приспособления для крепления детали, необходимых степеней свободы при взаимном базировании рабочих поверхностей брусков и обрабатываемой поверхности. Вследствие уменьшения погрешности базирования припуск под хонингование определяется в основном величиной исходной геометрической погрешности отверстия и является значительно меньше, чем необходимый припуск под шлифование.

Перечисленные выше факторы подтверждают преимущества процесса хонингования в производительности и точности по сравнению со шлифованием.

Вопросу аналитического исследования основных закономерностей исправления исходных погрешностей формы отверстия при хонинговании посвящены работы М. Х. Муллагулова [2] и И. Е. Фрагина [3] (для случая обработки тонкостенных цилиндров).

М. Х. Муллагулов для расчёта продолжительности обработки τ, необходимой для снижения величины погрешности формы от $\delta_{исх}$ до $\delta_{кон}$, получил следующую формулу:

$$\tau = \frac{1}{CK} \ln \frac{\delta_{исх}}{\delta_{кон}} \qquad (1)$$

где C – коэффициент, зависящий от жёсткости заготовки;

K – коэффициент, зависящий от режущей способности брусков;

l – длина хода инструмента, в мм;

n – число двойных ходов инструмента.

Ученый считает, что продолжительность обработки для устранения погрешности формы до заданной величины не зависит от давления брусков.

И. Е. Фрагин [3] при решении аналогичной задачи нашёл зависимости, связывающие время хонингования, припуск, жесткость деталей, число брусков, их режущую способность и удельное давление с начальной и конечной величинами погрешности формы, и посчитал, что интенсивность съёма металла Q_v при алмазном хонинговании изменяется во времени и описывается уравнением:

$$Q_v = \frac{P}{P_0}(\rho - \gamma\tau), \qquad (2)$$

где ρ и γ – коэффициенты, зависящие от режущей способности брусков;

P_0 – давление, при котором найдены коэффициенты ρ и γ;

P – давление брусков;

τ – текущее время.

В следующих своих исследованиях [4] И. Е. Фрагин констатирует, что при значении исходной овальности свыше 0,04…0,05 мм её устранение связано со значительными трудностями, а продолжительность отработки зависит от величины исходной овальности и режущей способности брусков инструмента.

Известно, что для финишной обработки глубоких отверстий разработаны различные конструкции хонинговальных головок [5]. Однако они не могут обеспечить высокую производительность и точность обработки, так как в глубоких отверстиях, длиной 1000 мм и выше, трудно обеспечить постоянный контроль геометрических параметров на каждом участке длины отверстия в процессе непрерывной обработки.

Цель статьи – определить пути повышения точности и производительности финишной обработки точных глубоких отверстий, влияющих на показатели процесса обработки.

Изложение основного материала. Исследования закономерностей исправления исходных погрешностей формы при хонинговании имеет первостепенное значение для обеспечения заданной точности и обоснования режимов обработки, а так же для расчёта припусков и создания специального инструмента.

Исходя из этого, для исследования влияния конструктивных особенностей инструмента и характера изменения удельного давления $P_{уд}$ на повышение точности и производительности при финишной обработке глубоких отверстий была разработана новая прогрессивная конструкция специальной хонинговальной головки (см. рис. 1).

Особенностью представленной хонинговальной головки является то, что последняя снабжена специальными колодками 1 (рис. 1, В–В), несущими на себе алмазные бруски, выполненные с возможностью изменения размера h по высоте при росте удельного давления P_y больше допустимого значения $P_{y\max}$, связанного с неравномерностью припуска.

Для установления экономических и точностных показателей разработанной хонголовки были проведены опытно-экспериментальные исследования по следующей методике.

Эксперименты проводились на токарно-винторезном станке модели 16К20, оснащённом специальным приспособлением с гидроцилиндром для установки и закрепления хонголовки шарнирно с возможностью осуществления возвратно-поступательного движения. Для сообщения вращательного движения заготовке последняя устанавливалась в шпинделе станка горизонтально и закреплялась жестко. Перемещение

разжимного штока для дозированной радиальной подачи брусков осуществлялось вручную после каждого двойного хода инструмента. Хонинговальная головка была оснащена шестью брусками марки АС6 200/160-М1-01-100% длиной 150 мм.

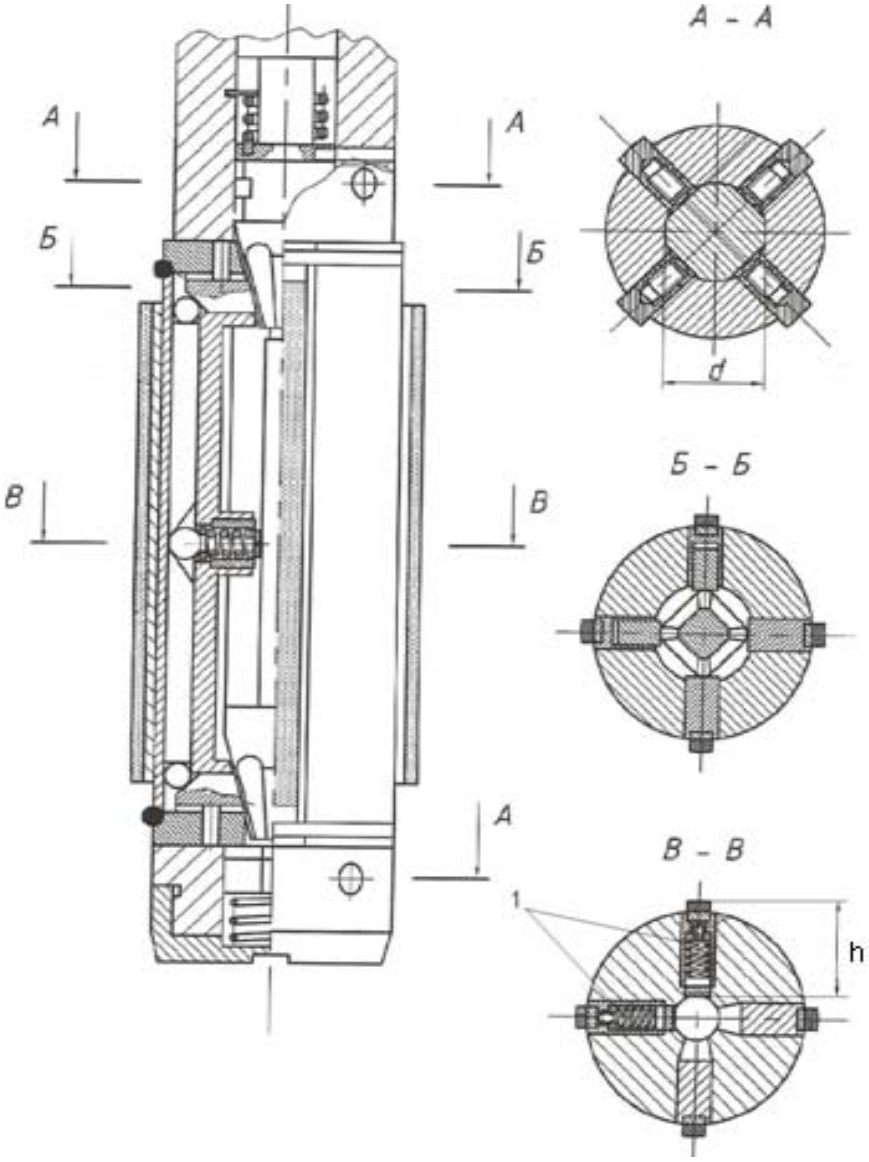


Рис. 1. Хонинговальная головка для обработки точных глубоких отверстий.

В качестве заготовки принята труба с длиной 1500 мм, нормальной точности, внутренним диаметром 52 мм, толщиной стенки 4 мм, материал 38ХМЮА, имитирующий цельный цилиндр нефтяного глубинного насоса с условным диаметром 52 мм.

Эксперименты проводились в три этапа, при разных значениях дозированной подачи $S_{доз}$ = 0,004 мм, 0,006 мм и 0,008 мм на каждый двойной ход инструмента.

Геометрические погрешности отверстия заготовки до хонингования: овальность отверстия – 0,15…0,32 мм на длине 1000 мм; отклонение от цилидричности – 0,3…0,35 мм на длине 1000 мм.

Отверстия заготовок до и после обработки измерялись с помощью специальной пневмопробки по расходу сжатого воздуха.

При проведении экспериментов постоянными параметрами процесса обработки были приняты скорости обработки $V_{окр}$ = 42 м/мин. и $V_{в.п.}$ = 12 м/мин.; длина поступательного хода инструмента – 1600 мм; время обработки – t = 7 мин.

Обработке подвергались 30 деталей по 10 штук в каждом этапе. В качестве СОЖ применялась смесь керосина с веретенным маслом соответственно в соотношении 5:1.

Диаметры отверстий измерялись на всей длине, и по данным замеров вычислены среднеарифметические значения съема металла, которые приведены в табл. 1, где также показаны средние значения съема металла и показания исправления исходных отклонений от круглости и цилиндричности при разных этапах обработки.

Таблица 1.

Показатели зависимости съема металла ΔD, интенсивности исправления исходных погрешностей отклонения от круглости $\Delta K_{кр}$ и цилиндричности отверстия.

Этапы обработки	Радиальная подача брусков (S), мм/дв.ход	Съем металла на диаметр (ΔD), мм	Отклонение от круглости ($\Delta K_{кр}$), мм	Отклонение от цилиндричности ($\Delta Ц$), мм	Коэффициент исправления отклонения от	
					круглости	цилиндричности
I	0,004	0,23	0,110	0,082	0,66	0,78
II	0,006	0,28	0,060	0,05	0,81	0,84
III	0,008	0,37	0,025	0,025	0,9	0,91

По данным таблицы построены графики зависимости съема металла ΔD, интенсивности исправления исходных погрешностей отклонения от круглости $\Delta K_{кр}$ (рис. 2) и цилиндричности отверстия (рис. 3).

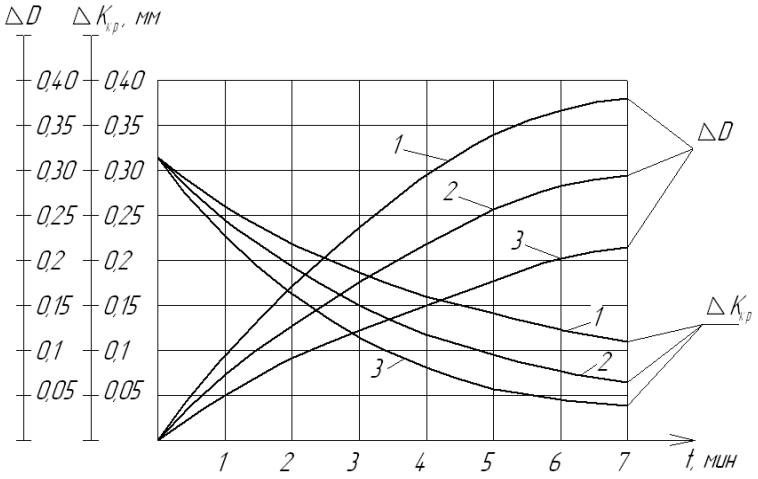


Рис. 2. Зависимость съема металла ΔD и интенсивность исправления отклонения от круглости $\Delta K_{кр}$ от времени хонингования t и величины дозированной подачи $S_{доз}$: 1 – при $S_{доз}$ = 0,004 мм/дв. ход; 2 – при $S_{доз}$ = 0,006 мм/дв. ход; 3 – при $S_{доз}$ = 0,008 мм/дв. ход.

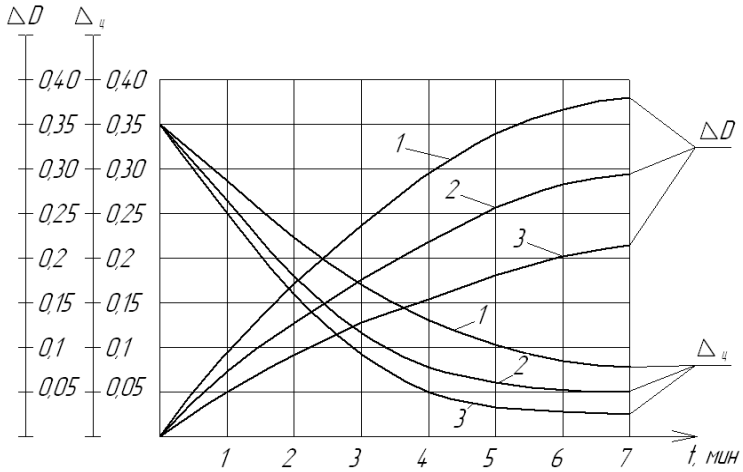


Рис. 3. Зависимость съема металла ΔD и интенсивность исправления отклонения от круглости $\Delta Ц$ от времени хонингования t и величины дозированной подачи $S_{доз}$: 1 – при $S_{доз}$ = 0,004 мм/дв. ход; 2 – при $S_{доз}$ = 0,006 мм/дв. ход; 3 – при $S_{доз}$ = 0,008 мм/дв. ход.

Как видно из графиков, величина съёма металла ΔD постоянно снижается с ростом продолжительности обработки t несмотря на то, что величина дозированной подачи брусков на обрабатываемую поверхность на протяжении одного цикла обработки была постоянной на каждый двойной ход инструмента. Это объясняется тем, что с продолжительностью обработки шероховатость поверхности постоянно уменьшается, опорная поверхность увеличивается, а постоянная величина дозированной радиальной подачи ΔS брусков проводит к росту удельного давления. А это, как видно из конструкций хонголовки, способствует к сжатию специальных колодок 1 по радиусу R, (рис. 1, В–В), что способствует к снижению удельного давления P_y бру-

сков на обрабатываемую поверхность и тем самым к снижению съёма металла.

Таким образом, выражение (2) для расчёта величины съёма металла с учётом упругости инструмента можно записать в виде:

$$Q_v = \frac{P}{P_0}(\rho - r_2)K_u, \qquad (3)$$

где K_u – коэффициент упругости инструмента.

Для дальнейшего совершенствования процесса финишной обработки глубоких отверстий с использованием разработанной хонинговальной головки в настоящее время проводятся исследовательские работы по созданию многофункционального шпиндельного узла для хонинговальных станков, что позволяет повысить точность обработки и расширить технологические возможности станка.

Конструкции разработанной хонинговальной головки защищена авторским свидетельством СССР №715304 и была испытана при изготовлении цельных цилиндров скважинных глубинных насосов длиной 3500 мм и условным диаметром 43 мм.

Вывод. Результаты испытаний показали, что производительность обработки по сравнению с показателями известных хонголовок повысилась в 1,5–2 раза, а точность по цилиндричности отверстия – до 0,02 мм, по конусообразности – до 0,015 мм на длине 1000 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Немцев Б. А. О выборе основных параметров процесса глубокого сверления отверстий малых диаметров с относительной длиной больше 100. Интенсификация технологических процессов механической обработки / Б. А. Немцев, П. Д. Яковлев // Прогрессивные технологические процессы, инструменты и оснастка для обработки глубоких отверстий. – 1986. – № 3. – С. 65–66.
2. Муллагулов М. Х. Радиальные деформации от давления брусков и величина припуска при хонинговании тонкостенных цилиндров / М. Х. Муллагулов // Сборник трудов ВЗПИ. – М. : ВЗПИ, 1966. – Вып. 35. – С. 66–75.
3. Фрагин И. Е. Точность и производительность при алмазном хонинговании и суперфинишировании / И. Е. Фрагин. // Алмазная обработка деталей тракторов и сельхозмашин. – М. : НИИТракторсельхозмаш, 1973. – Вып. 5. – С. 5–21.
4. Фрагин И. Е. К теории устранения исходной погрешности при хонинговании тонкостенных цилиндров / И. Е. Фрагин // Алмазно-абразивная обработка деталей машин. – М. : ОНТЭИ, 1970. – С. 21–50.
5. Куликов А. С. Хонингование : справочное пособие / А. С. Куликов, В. А. Романчук, Ф. Ф. Ризванов. – М. : Машиностроение, 1973. – 180 с.

УДК 621.74.043

Падерин В. Н., Хачикова И. С.

СПОСОБ ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ В ВАКУУМЕ С ДВУМЯ КАМЕРАМИ ПРЕССОВАНИЯ

У статті розглянутий вплив способу литва під тиском з двома камерами пресування на газоусадочну пористість і герметичність відливань при литві алюмінієвих сплавів.

Ключові слова: *литво під тиском, вакуум, камера пресування, пористість, герметичність, пресформа, машина ливарні.*

В статье рассмотрено влияние способа литья под давлением в вакууме с двумя камерами прессования на газо-усадочную пористость и герметичность отливок при литье алюминиевых сплавов.

Ключевые слова: *литье под давлением, вакуум, камера прессования, пористость, герметичность, пресс-форма, литейная машина.*

The article runs that the method of casting under vacuum pressure with two chambers of pressing on gas-shrinking porosity and hermeticy of castings during the casting of aluminium alloys.

Key words: *casting under pressure, vacuum, pressing chamber, porosity, impermeability, press-form, casthouse machine.*

Постановка проблемы. Литье под давлением (ЛПД) – это малоотходный, высокопроизводительный процесс получения точных литых заготовок, сложной конфигурации с качественной поверхностью. Однако применение этого способа, особенно для ЛПД алюминиевых сплавов, часто ограничивается из-за повышенной пористости (П%) в отливках [1; 2], которая снижает их плотность и герметичность (Г%). Это связано, с одной стороны, с низкой эффективностью вентсистемы [3; 4], а с другой стороны, из-за затвердевания питателей раньше, чем отливки, действие давления подпрессовки также неэффективно [5].

В настоящее время данная выявленная проблема является важной производственной задачей.

Анализ публикаций [6–8] показывает, что в литературе имеются ограниченные данные о способах, позволяющих гарантированно получать плотные и Г% отливки.

Наиболее эффективным способом является система ЛПД с двумя камерами прессования (ДКП) [8], позволяющая изготавливать в пресс-формах вентиляционную систему с расчетно-необходимой площадью для удаления воздуха и газов СМ, а также обеспечения действия давления подпрессовки до полного затвердевания отливки, что дополнительно снижает воздушно-газовую и усадочную П%. Однако этот способ также не позволяет полностью удалить воздух и газы СМ из-за низкого перепада давлений между рабочей полостью пресс-формы и атмосферой во время заполнения, не обеспечивающего надкритического режима удаления газов, и их часть все равно попадает в отливку, образуя П%.

Цель данной **статьи** – усовершенствовать способа ЛПД с ДКП, который позволил бы удалить из пресс-формы весь воздух и газы СМ для получения максимальной плотности и Г% отливок, а также уменьшить усадочную П%.

Изложение основного материала. В связи с этим нами был разработан способ ЛПД ***в вакууме*** с ДКП [9], позволяющий за счет надкритического режима удаления газов повысить плотность и Г% отливок, а также уменьшить усадочную П% за счет питания отливки до полного ее затвердевания. Поставленная нами цель достигается за счет применения цилиндра вакуумирования 26 (рис. 1), встроенного в цикл прессования литейной машины и позволяющего создать надкритический режим удаления воздуха и газов СМ из рабочей полости пресс-формы в цилиндр вакуумирования 26, обеспечивая максимальную плотность и Г% отливок.

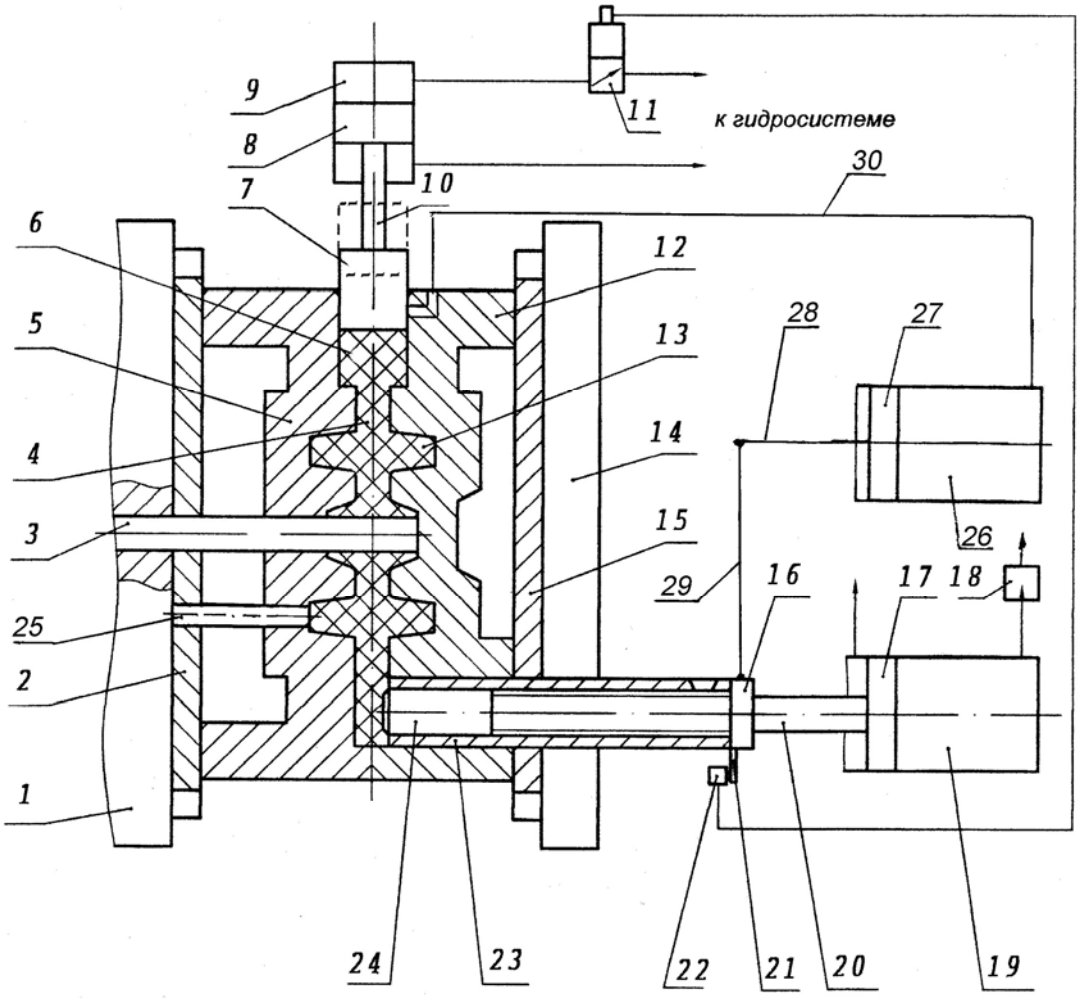


Рис. 1. Устройство для реализации способа ЛПД в вакууме с ДВК (конечное положение): 1 – подвижная плита, 2 – плита крепления, 3 – стержень, 4 – вентиляционная система, 5 – подвижная матрица, 6 – вторая камера прессования, 7 – пресс-поршень, 8 – поршень, 9 – механизм подпрессовки, 10 – шток, 11 – электрогидроклапан, 12 – неподвижная матрица, 13 – отливка (рабочая полость пресс-формы), 14 – подвижная плита машины, 15 – плита крепления, 16 – регулируемый упор, 17 – поршень, 18 – гидродроссель, 19 – механизм прессования, 20 – шток, 21 – планка, 22 – конечный выключатель, 23 – камера прессования, 24 – пресс-поршень, 25 – выталкиватель, 26 – пневмоцилиндр вакуумирования, 27 – поршень, 28 – шток, 29 – рычаг, 30 – трубопровод.

В устройство для реализации способа дополнительно введен вертикальный механизм подпрессовки 9 со второй камерой прессования 6, состоящей из двух половин, соединенных по плоскости разъема, которая, с одной стороны, подключена к цилиндру вакуумирования 26, установленного параллельно механизму прессования 19, поршень которого 27 через шток 28 и рычаг 29 жестко соединен со штоком 20 механизма прессования 19, а с другой, – через трубопровод 30 соединен с вентканалом 6 с толщиной не меньше толщины отливки с рабочей полостью пресс-формы 13, в результате чего сначала происходит заполнение и одновременно вакуумирование рабочей полости пресс-формы 13 и части второй камеры прессования 6, а затем с помощью дополнительного вертикального механизма 9 осуществляется подпрессовка расплава с целью максимального сжатия оставшегося вохдуха и газов СМ.

При данном обстоятельстве обеспечивается питание отливки во время кристаллизации до полного затвердевания, низкая П%, а также высокая плотность и Г%. При необходимости для уменьшения риска попадания расплава в систему вакуумирования между трубопроводом 30 и второй камерой прессования 6 нужно установить игольчатый фильтр с общей расчетной площадью между иголками, необходимой для удаления воздуха и газов СМ.

Учитывая, что при заполнении расплавом камеры прессования 23 (из практики ЛПД) свыше 70% от ее объема во время движении пресс-поршня 24 происходит выплескивание части расплава через заливочное окно в атмосферу цеха, что может привести к травме литейщика. Кроме того, для уменьшения общего объема удаляемого воздуха и газов СМ из пресс-формы (до 50%) необходимо полностью заполнять камеру прессования 23 расплавом, а заливочное окно закрывать ручным или механизированным способом.

Поэтому в устройство для реализации способа ЛПД в вакууме с ДКП ***дополнительно*** введено автоматическое устройство для закрытия и открытия заливочного окна камеры прессования 23, работающее от гидросистемы литейной машины, которое показано на рис. 2.

Определение основных параметров устройства для способа ЛПД в вакууме с ДКП, обеспечивающих высокую плотность и Г% отливок. Максимальное качество отливок достигается при оптимальной скорости, обеспечивающей сплошное последовательное заполнение рабочей полости пресс-формы расплавом, которая устраняет его смешивание с воздухом и газами СМ и определяется практическим путем с помощью способа изготовления неполных отливок [9].

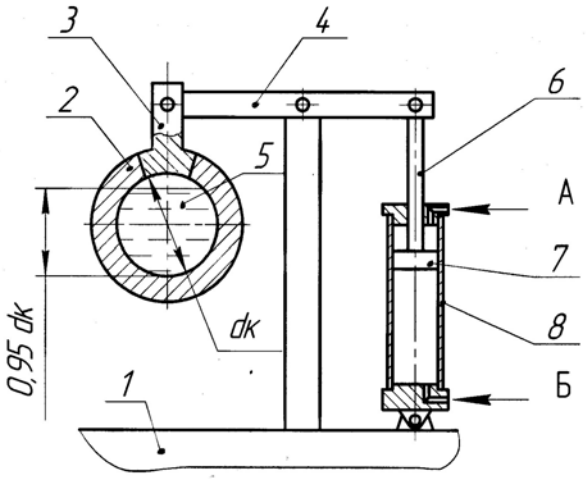


Рис. 2. Автоматическое устройство для закрытия и открытия заливочного окна камеры прессования: 1 – основание литейной машины; 2 – камера прессования; 3 – пробка; 4 – рычаг; 5 – расплав; 6 – шток; 7 – поршень; 8 – гидроцилиндр; А, Б – места подключения к гидросистеме.

На рис. 3 показаны неполные отливки, полученные путем остановки пресс-поршня 24 при различных скоростях заполнения пресс-формы расплавом, из которых видно, что оптимальный режим заполнения для показанной отливки корпуса пневмодросселя ПКР25 находится в диапазоне от 2 до 3 м/сек.

а) $V = 2$ м/сек б) $V = 3$ м/сек

Рис. 3. Определение оптимальной скорости сплошного последовательного режима заполнения для корпуса ПКР25.

При дальнейшем увеличении скоростей заполнения образуется оболочка из расплава, перекрывающая вентсистему, и весь оставшийся воздух и газы СМ попадают в тело отливки, образуя высокую П%, которая в сочетании с усадочной П% снижает плотность и Г% отливок. Очевидно, что для других отливок в зависимости от их объема и конфигурации оптимальные значения скоростей заполнения будут иметь другие значения.

Определение диаметра камеры прессования $d_к$ производим по формуле (1) или номограмме (рис. 4):

$$d_к = \sqrt{\frac{1{,}274V_{\Sigma 1}}{\Lambda_4}}, \qquad (1)$$

где $V_{\Sigma 1}$ – объем заливаемого расплава;
Λ_4 – длина камеры прессования.

Объем заливаемого расплава определяется по формуле:

$$V_{\Sigma 1} = V_{отл.} + V_{л.с.} + V_{в.с.}, \qquad (2)$$

где $V_{отл.}$ – объем отливки;
$V_{л.с.}$ – объем литниковой системы;
$V_{в.с.}$ – объем вентиляционной системы, заполненной расплавом;
$V_{л.с.}$ и $V_{в.с.}$ определяются конструкцией пресс-формы.

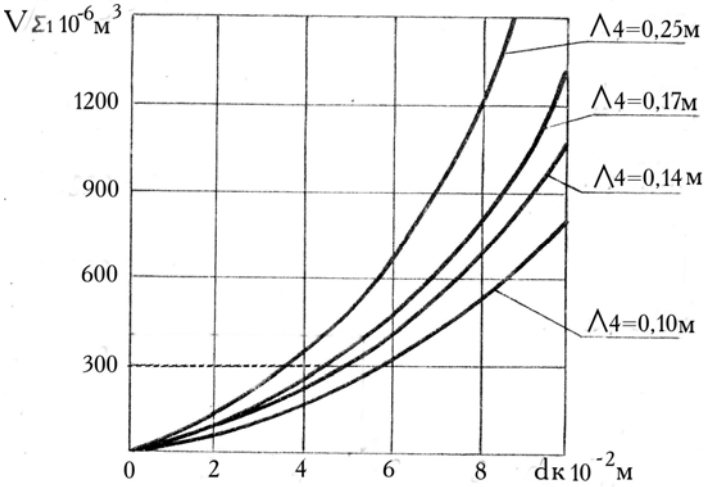


Рис. 4. Номограмма для определения $d_к$ в зависимости от $V_{\Sigma 1}$ и Λ_4.

При необходимости $d_к$ округляем до ближайшего стандартного ряда размеров пресс-поршней, применяемых в производстве.

Рекомендуется длину камеры прессования Λ_4 выбирать исходя из качества поверхности отливки, учитывая, что чем меньше Λ_4, тем меньше и время заполнения расплавом рабочей полости пресс-формы при оптимальной скорости заполнения, тем лучше чистота поверхности отливок (см. рис. 3).

Зная $V_{\Sigma 1}$, объем натекания через незначительные зазоры в пресс-форме между подвижными знаками и выталкивателями – $V_{нат.} = 0{,}1–0{,}2V_{отл.}$ и объем выделяющихся газов от сгорания смазки $V_{г.см.} = 0{,}2–0{,}5V_{отл.}$, суммарный объем газов ΣV_1 определяется по формуле:

$$\Sigma V_1 = V_{\Sigma 1} + V_{г.см.} + V_{нат.} \qquad (3)$$

Зная ΣV_1 и время $\tau_{п1}$, определяемое миллисекундомером или тензометрическими датчиками, расход газов q_1 из рабочей полости пресс-формы находим по формуле:

$$q_1 = \Sigma V_1/\tau_{п1} \qquad (4)$$

Зная q_1, определяем эффективную площадь вентсистемы $\mu_1' f_1'$, принимая допущение, что режим истечения газов из полости пресс-формы – надкритический – по номограмме (рис. 5).

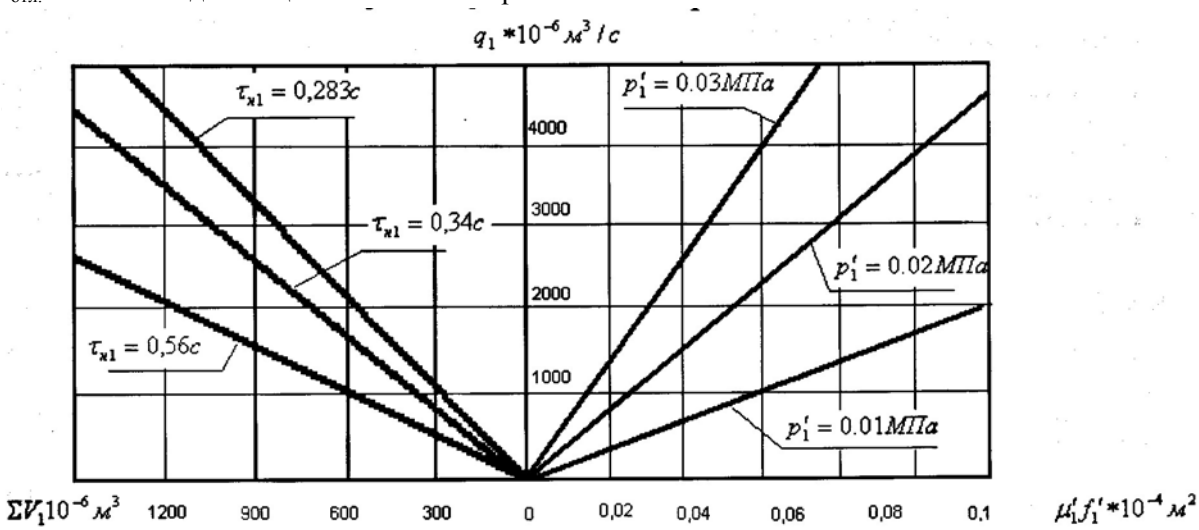


Рис. 5. Номограмма для определения q_1 и $\mu_1' f_1'$ в зависимости от $\sum V_1$ и p_1'.

При расчете $\mu_1' f_1'$ рекомендуется значением p_1' задаваться с запасом и принимать ≤0,02 Мпа. Принимаем, что холостой ход цилиндра вакуумирования в исходном положении $V_{х.ц.}$ = 0,1–0,2$V_{отл.}$, тогда суммарный объем газов, удаляемых в цилиндр вакуумирования $\sum V_3$, определяем по формуле:

$$\sum V_3 = \sum V_1 + V_{в.с.} + V_{тр.} + V_{х.ц.} \qquad (5),$$

где $V_{в.с.}$ – объем вентсистемы, не занятой расплавом;

$V_{тр}$ – объем трубопровода, соединяющего вентсистему с цилиндром вакуумирования;

$V_{в.с}$ и $V_{тр}$ определяются конструктивно.

Зная $\sum V_3$ и Λ_4, определяем диаметр цилиндра вакуумирования $D_{ц.в}$ по формуле (6) или по номограмме (рис. 6) (для Λ_4 = 170 мм и различных значений p_1'), тогда:

$$D_{ц.в.} = \sqrt{p_o 4\Sigma V_3 / p_1'}\pi\Lambda_4 . \qquad (6)$$

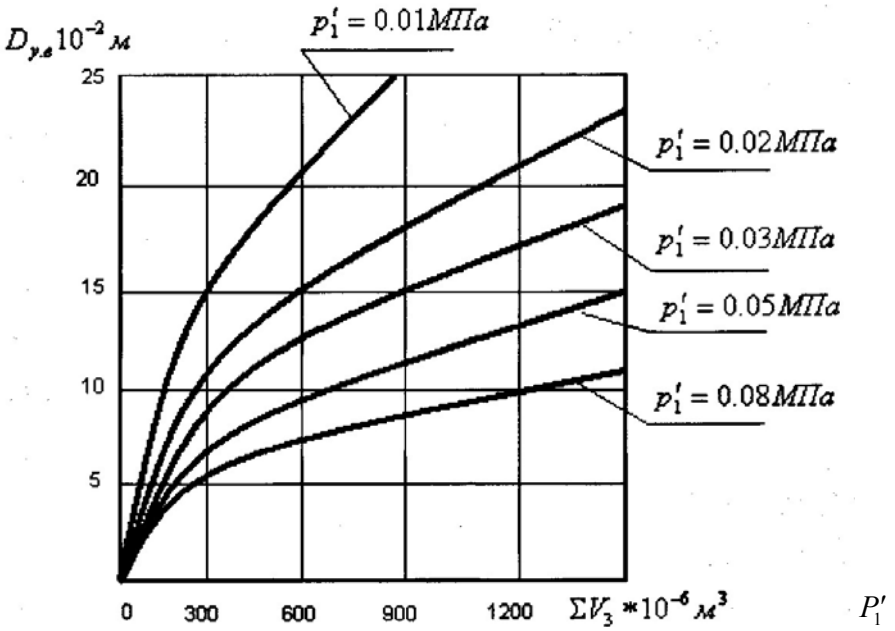


Рис. 6. Номограмма для определения $D_{ц.в}$ в зависимости от $\sum V_3$

Вывод. Предлагаемый способ литья под давлением в вакууме с двумя камерами прессования позволяет уменьшить П% и повысить плотность и Г% отливок. При этом брак по негерметичности составляет не более 2–3%. Незначительное количество брака связано с усадочной П% , образующейся при переходе расплава из жидкого состояние в твердое.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белопухов А. К. Газосодержание отливок при литье под давлением / А. К. Белопухов. – М. : Машиностроение, 1982. – 287 с.
2. Зеленов В. Н. Газовый режим процесса литья под давлением / В. Н. Зеленов // Литейное производство. – 1983. – № 7. – С. 17–20.
3. Швецов В. Д. Факторы эффективности вентиляционных устройств формы при литье под давлением / В. Д. Швецов // Литейное производство. – 1975. – № 5. – С. 26–28.
4. Падерин В. Н. Повышение вентилируемости пресс-форм литья под давлением с целью снижения пористости отливок / В. Н. Падерин., Е. А. Нуриев // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. Выпуск 11. Технические науки. – Симферополь : НИЦ КИПУ, 2008. – С. 48–54.
5. Белопухов А. К. Литье под давлением. Проблемы подпрессовки / А. К. Белопухов. – М. : Машиностроение, 1971. – 285 с.
6. Гаспарян Л. А. Влияние вакуума на газосодержание отливок и параметры процесса / Л. А. Гаспарян // Пористость в отливках, полученных литьем под давлением и мероприятия по борьбе с ней. – М. : МДНТП, 1984. – С. 6–7.
7. Падерин В. Н. Исследование системы вакуумирования пресс-форм литья под давлением в цикле прессования с контрпоршнем и механическим управлением клапаном перекрытия вентиляционной системы / В. Н. Падерин, Н. А. Изеттов, А. П. Гресько // Ученые записки Крымского государственного инженерно-педагогического института. Выпуск 3. – Симферополь : ДОЛЯ, 2002. – С. 15–19.
8. Падерин В. Н. Исследование влияния способа литья под давлением с двумя камерами прессования на пористость и герметичность отливок из алюминиевых сплавов / В. Н. Падерин, В. И. Галух // Ученые записки крымского инженерно-педагогического университета. Выпуск 11. Технические науки. – Симферополь : НИЦ КИПУ, 2008. – С. 54–59.
9. Пат. 29636 Украина, МПК B22D 17/22. Способ литья под давлением с двумя камерами прессования / Падерин В.Н., Галух В.И. (UA). – № u2007 08338 ; заявл. 20.07.2007 ; опубл. 25.01.2008, Бюл. № 2.

УДК 539.34

Усеинов Б. К.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАВНОМЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА НА ОБРАБАТЫВАЕМУЮ ПОВЕРХНОСТЬ ПРИ ХОНИНГОВАНИИ ОТВЕРСТИЙ

У статті розглядаються питання забезпечення рівномірного тиску інструмента на оброблювану поверхню деталі, при обробці внутрішніх циліндричних і конічних поверхонь шліфуванням хонінгуванням в умовах повного контакту інструмента й поверхні і, як наслідок, збільшення точності обробки.

Ключові слова: *оброблювана поверхня, шліфування, хонінгування, рівномірний тиск інструмента, колодка хона, балка рівного опору, рівномірне навантаження.*

В статье рассматриваются вопросы обеспечения равномерного давления инструмента на обрабатываемую поверхность детали, при обработке внутренних цилиндрических и конических поверхностей шлифованием, хонингованием в условиях полного контакта инструмента и поверхности и как следствие, увеличение точности обработки.

Ключевые слова: *обрабатываемая поверхность, шлифование, хонингование, равномерное давление инструмента, колодка хона, балка равного сопротивления, равномерное нагружение.*

In article are considered questions of the ensuring the even pressure of the instrument on processed surface of the detail, when processing internal cylindrical and cone-shaped surfaces polishing honingation in condition of the full contact of the instrument and surfaces and as effect, increase to accuracy of the processing.

Key words: *processed surface, polishing, honingation even pressure of the instrument, shoetree hons, beem of the equal resistance, even load.*

Постановка проблемы. При обработке шлифованием внутренних цилиндрических и конических поверхностей возникает проблема обеспечения равномерного давления инструмента на обрабатываемую поверхность в крайних верхних и нижних положениях инструмента, что влияет на точность обработки.

Особенно это относится к вопросам хонингования конических поверхностей, когда хонинговальные бруски закрепляются в головке механически с опиранием на шарнирные опоры. Это позволяет копировать обрабатываемую коническую поверхность. Существует проблема точности обработки при переменном радиусе конуса. Она может быть решена разными способами. Основной из них – обеспечение равномерного давления бруска на обрабатываемую поверхность. Наиболее просто эта проблема решается путем придания инструменту специальной формы в виде балки равного сопротивления при условии нагружения ее равномерно распределенной нагрузкой по всей длине, контактирующей с обрабатываемой поверхностью.

Анализ литературы. В работах [1–4] приведены сведения о процессе хонингования, характеристики брусков и режимы обработки. Рассмотрены основные типы хонинговальных головок, системы разжима брусков, приспособления и характеристики хонинговальных станков для обработки наружных и внутренних цилиндрических поверхностей.

Цель данной **статьи** – предложить обеспечение равномерного давления шлифовального инструмента при обработке внутренних цилиндрических и конических поверхностей при условии полного контакта инструмента и поверхности.

Изложение основного материала. При обработке поверхностей шлифованием для обеспечения точности обработки немаловажное значение имеет обеспечение равномерного давления инструмента на обрабатываемую поверхность. В случае достаточной жесткости инструмента и детали вопрос можно считать снятым, но в случае недостаточной жесткости инструмента и детали для обеспечения точности необходимы дополнительные мероприятия. Это имеет место при обработке цилиндрических или конических внутренних поверхностей деталей инструментом заданных, достаточно малых размеров.

На рис. 1 представлена конструкция и размещение комплекта брусков в корпусе хонинговальной головки. Бруски устанавливаются и закрепляются на колодках, которые представляют собой балочки на двух опорах. В этих случаях в процессе шлифования балочки деформируются, и за счет этого изменяется давление бруска на обрабатываемую поверхность, что сопряжено или с отклонением размеров, или с неравномерным износом инструмента. Для устранения этих проблем необходимо или исключить неравномерное давление инструмента, или обеспечить переменное сечение инструмента и тем самым увеличить его жесткость, т. е. выполнить конструктивные и технологические мероприятия.

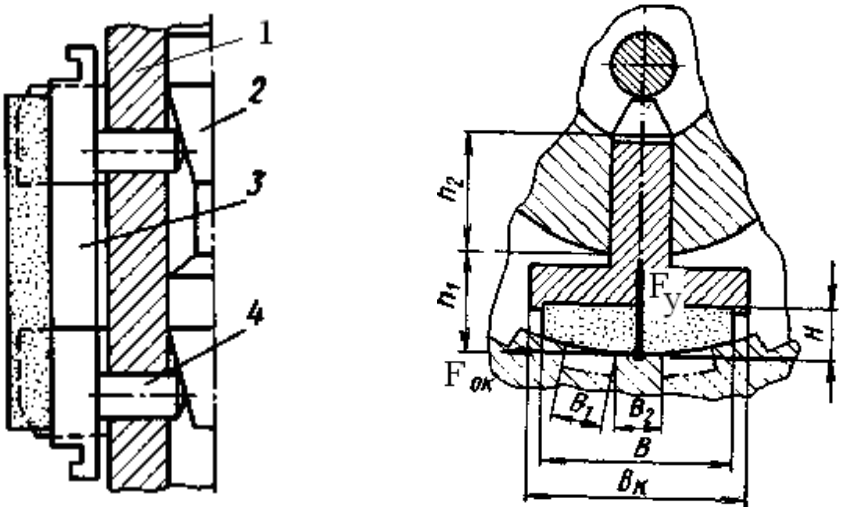


Рис. 1. Конструкция колодок: 1 – планка; 2 – разжимной конус; 3 – колодка с бруском; 4 – опорные штыри.

На наш взгляд, второй подход является более целесообразным и менее трудоемким, т. к. стандартные инструменты, применяемые для обработки внутренних поверхностей, как правило, не обеспечивают постоянное давление на поверхности инструмента и детали. В этих случаях инструмент можно представить как балку равного сопротивления, которая при равномерном внешнем давлении обеспечивает равномерное давление на обрабатываемую поверхность, за счет переменного сечения колодки по длине, и естественно, переменной жесткости.

В качестве примера рассмотрим процесс обработки внутренней конической поверхности хонингованием, т. к. этот случай наиболее чувствителен на предмет равномерного давления колодки хона на обрабатываемую поверхность в силу переменного радиуса конуса.

Рассмотри вариант положения колодки с полным контактом по всей длине. Поставим задачу определения формы поверхности противоположной контактной с обрабатываемой поверхностью (рис. 2).

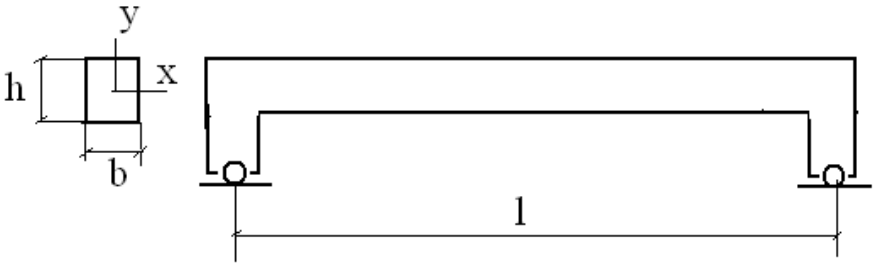


Рис. 2. Схема колодки.

Представим колодку в виде двухопорной балки, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой q = const (рис. 3).

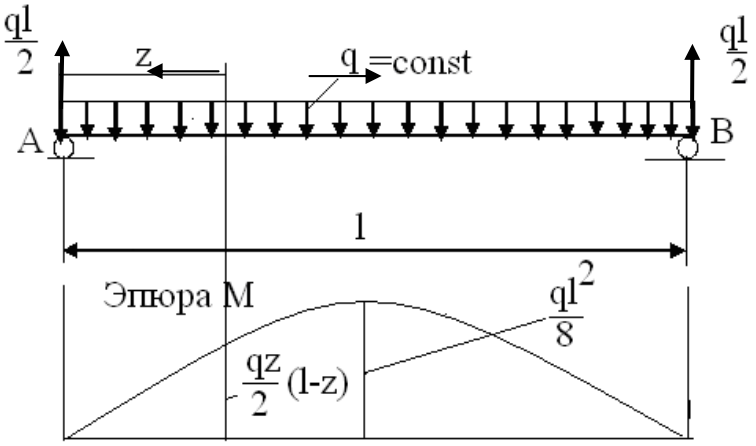


Рис. 3. Расчетная схема колодки.

Эпюра моментов строится обычным способом, и наибольший момент имеет место в середине пролета балки.

Условие прочности балки имеет вид:

$$\sigma = \frac{M}{W} \le [\sigma], \qquad (1)$$

где σ – нормальные напряжения в текущем сечении балки;
M – изгибающий момент в текущем сечении пролета балки;
W – переменный по длине момент сопротивления сечения балки изгибу;
[σ] – допускаемое напряжение для материала колодки.

В связи с тем, что колодки обычно изготовляются из конструкционных сталей, обладающих пластическими свойствами, в качестве допускаемых напряжений можно принять отношение предела текучести σ_T на коэффициент запаса:

$$n = 1{,}5 \div 2, \text{ т. е. } [\sigma] \times \frac{\sigma_T}{n}. \qquad (2)$$

Соотношение размеров поперечного сечения определяется выражением момента сопротивления W. Для прямоугольного сечения колодки он имеет вид:

$$W_x = \frac{bh^2{}_z}{6}, \qquad (3)$$

где b – стандартная ширина сечения;
h_z – переменная высота сечения для балки равного сопротивления.

Подставляя текущие значения изгибающего момента M из эпюры и (3) в условие (1), получим:

$$h_z = \sqrt{\frac{3qz(l-z)}{b[\sigma]}} - \qquad (4)$$

переменную по длине балки высоту сечения, которая обеспечивает равномерное давление абразивной колодки на обрабатываемую поверхность детали, т. е. q = const.

Начальная высота колодки на опорах выбирается из конструктивных соображений, а кривая (4) определяет значения высоты сечения по длине колодки. Например, в середине колодки, при

$$z = \frac{l}{2}, \; h_{\frac{l}{2}} = \frac{l}{2}\sqrt{\frac{3q}{b[\sigma]}} \qquad (5)$$

Вычисляя значения h_z по длине колодки со стороны опор, получим конфигурацию переменной высоты, обеспечивающей q = const, т. е. постоянное давление на поверхности обрабатываемой детали.

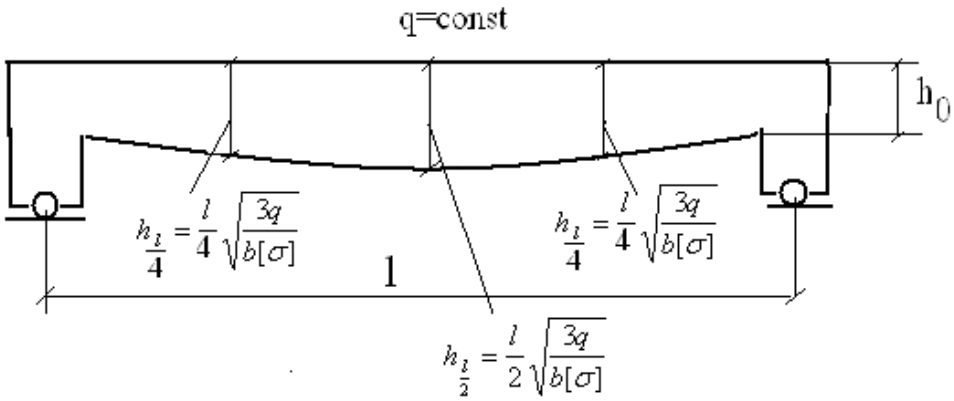


Рис. 4. Расчетная форма колодки с переменной высотой.

Выводы. Предлагаемая методика позволяет с наименьшими затратами обеспечить равномерное давление инструмента на обрабатываемую поверхность, что в итоге скажется на точности обработки при хонинговании, особенно конических отверстий различных затворов нефтегазопроводов и деталей другого назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Инструменты для обработки точных отверстий / [С. В. Кирсанов, В. А. Гречишников, А. Г. Схиртладзе, В. И. Кокарев]. – М. : Машиностроение, 2003. – 330 с.
2. Куликов С. И. Прогрессивные методы хонингования / С. И. Куликов, Ф. Ф. Ризванов и др. – М. : Машиностроение, 1983. – 135 с.
3. Куликов С. И. Хонингование : справочное пособие / С. И. Куликов и др. – М. : Машиностроение, 1973. – 168 с.
4. Холмогорцев Ю. П. Оптимизация процессов обработки отверстий / Ю. П. Холмогорцев. – М. : Машиностроение, 1984. – 184 с.