

**О.О. АНДІЛАХАЙ**, д-р техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ», Маріуполь

## **РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ЗАТОПЛЕНИМИ СТРУМЕНЯМИ**

Розроблено нову математичну модель визначення енергосмності обробки з урахуванням різних форм мікрорізів: з постійною товщиною та з товщиною зрізу, що збільшується й зменшується в часі. Доведено, що найменша енергосмність досягається при мікрорізанні зі зменшуваною в часі товщиною зрізу. Це вказує на те, що найбільш ефективною областю застосування методу абразивної обробки затопленими струменями є обробка кромek заготовок, усунення задирок і зменшення мікронерівностей на оброблюваних поверхнях дрібних деталей.

**Ключові слова:** абразивна обробка, процес різання, абразивне зерно, товщина зрізу, сила різання, енергосмність обробки.

**Вступ.** У цей час у машинобудуванні технологічні операції обробки дрібних точних деталей (масою до 3 г) невеликої жорсткості й складної конфігурації залишилися не механізованими, часто здійснюються вручну й вимагають нових технологічних рішень. Це обумовлено в першу чергу низькою ефективністю застосування на даних операціях прогресивних методів струминно-абразивної обробки. Тому запропоновано ефективний метод абразивної обробки, який здійснюється за допомогою струменів стисненого повітря, затоплених абразивною суспензією. При цьому забезпечується схоронність (довговічність) сопел, які подають стиснене повітря, і стабільність процесу обробки. Однак даний метод недостатньо досліджений, відсутні методики розрахунку оптимальних параметрів обробки, що не дозволяє повною мірою виявити й реалізувати на практиці його високі технологічні можливості. У зв'язку із цим важливо обґрунтувати умови підвищення якості, продуктивності й стабільності фінішної обробки дрібних точних деталей невеликої жорсткості й складної конфігурації на основі розробки й застосування ефективного методу абразивної обробки затопленими струменями.

**Аналіз останніх досліджень.** Дослідженню традиційних методів струминно-абразивної обробки в науково-технічній літературі приділена достатньо велика увага [1, 2]. Отримано ряд важливих теоретичних рішень [3 – 5], які дозволяють науково обґрунтовано підійти до вибору оптимальних умов обробки. Однак, дотепер відсутня загальноприйнята теорія фінішної абразивної обробки деталей затопленими струменями, що відображає взаємодію незакріпленого абразивного зерна й оброблюваної деталі, які рухаються в повітряному струмені з рідиною. Враховуючи викладене вище, актуальною є задача розробки математичної моделі визначення технологічних параметрів

абразивної обробки деталей затопленими струменями й виявлення умов підвищення ефективності процесу.

**Постановка задачі.** На відміну від традиційних процесів струминно-абразивної обробки, застосування пропонованого методу абразивної обробки деталей затопленими струменями дозволяє знімання матеріалу виконувати під різними кутами входу абразивного зерна в оброблюваний матеріал. Це відкриває нові технологічні можливості формоутворення поверхонь, зниження енергоємності обробки й підвищення інтенсивності знімання матеріалу. Однак, для визначення оптимальних умов обробки необхідно знати закономірності утворення мікрорізів окремими абразивними зернами й параметри силової напруженості процесу різання, особливо енергоємності обробки. Тому важливо аналітично описати енергоємність обробки залежно від кута входу абразивного зерна в оброблюваний матеріал. Це дозволить визначити технологічні можливості підвищення якості та продуктивності обробки й науково обґрунтовано підійти до проектування установок для здійснення даного методу обробки.

**Математична модель.** В основу рішення покладена умова рівності кінетичної енергії абразивного зерна, що рухається,  $W = m \cdot V_0^2 / 2$ , і роботи різання  $A = P_z \cdot l$ , де  $m$  – маса абразивного зерна, кг;  $V_0$  – початкова швидкість руху абразивного зерна, м/с;  $P_z = \sigma \cdot a \cdot v$  – тангенціальна складова сили різання, Н;  $\sigma$  – умовне напруження різання, Н/м<sup>2</sup> (енергоємність обробки, Дж/м<sup>3</sup>);  $a, v, l$  – товщина, ширина й довжина зрізу, м. Об'єм зрізу окремим зерном визначається за формулою:

$$g_{\text{зріз}} = a \cdot v \cdot l = \frac{m \cdot V_0^2}{2 \cdot \sigma}. \quad (1)$$

Аналіз залежності (1) показує, що збільшити  $g_{\text{зріз}}$  при заданій кінетичній енергії абразивного зерна  $W = m \cdot V_0^2 / 2$  можна винятково за рахунок зменшення енергоємності обробки  $\sigma$ , а зменшити товщину зрізу (параметр шорсткості поверхні  $R_{\text{max}} \approx a$ ) при заданому значенні  $g_{\text{зріз}} = a \cdot v \cdot l$  можна збільшенням довжини зрізу  $l$  (рис. 1):

$$R_{\text{max}} = \frac{g_{\text{зріз}}}{v \cdot l}. \quad (2)$$

Для реалізації цих умов необхідно встановити функціональні зв'язки параметра  $\sigma$  залежно від кута входу  $\alpha$  зерна в оброблюваний матеріал з позицій теорії різання матеріалів. Тому розглянуті закономірності знімання матеріалу в момент входу зерна в оброблюваний матеріал (випадок різання з товщиною зрізу, що збільшується в часі) і в момент виходу зерна з контакту з

оброблюваним матеріалом (випадок різання зі зменшуваною в часі товщиною зрізу). У першому випадку (рис. 2) дотичне напруження  $\tau$ , що виникає в умовній площині зсуву  $OA$ , описується залежністю

$$\tau = \frac{P_y}{2 \cdot \delta \cdot a \cdot \sin \psi_1 \cdot \cos \alpha} \cdot [\sin(2\beta - \alpha + \psi_1) - \sin(\alpha + \psi_1)], \quad (3)$$

де  $P_y$  – радіальна складова сили різання, Н;  $\beta$  – умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу;  $\psi_1 = \psi + \gamma$ ;  $\psi$  – умовний кут тертя зерна з оброблюваним матеріалом;  $\gamma$  – негативний передній кут зерна.

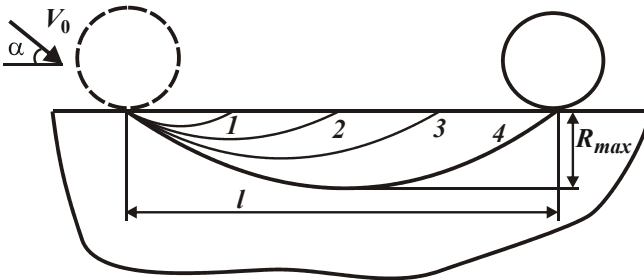


Рис. 1 – Траєкторії руху абразивного зерна в оброблюваному матеріалі залежно від його кінетичної енергії:  $W_1 < W_2 < W_3 < W_4$ .

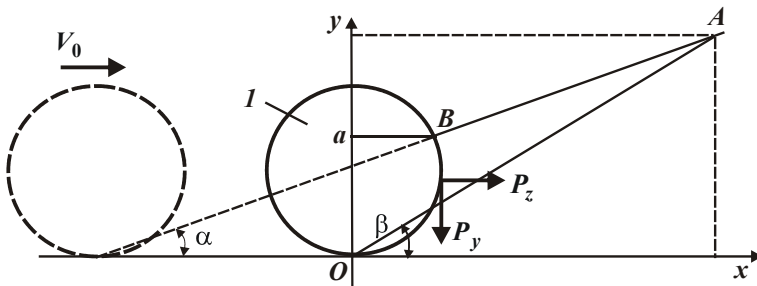


Рис. 2 – Розрахункова схема процесу різання одним абразивним зерном 1.

За умови  $\sin(2\beta - \alpha + \psi_1) = 1$  дотичне напруження  $\tau$  приймає максимальне значення  $\tau_{\max}$ , що визначає положення умовної площини зсуву оброблюваного матеріалу, яка розташована під кутом

$$\beta = \frac{\pi}{4} + \frac{\alpha - \psi_1}{2}. \quad (4)$$

При  $\tau_{\max} = \tau_{\text{зсув}}$  радіальна  $P_y$  й тангенціальна  $P_z$  складові сили різання, а також умовне напруження різання (енергоємність обробки)  $\sigma = P_z / (a \cdot \delta)$

визначаються за формулами:

$$P_y = 2 \cdot a \cdot \vartheta \cdot \tau_{зсув} \cdot \sin \psi_1 \cdot \cos \alpha \cdot \frac{1}{[1 - \sin(\alpha + \psi_1)]}; \quad (5)$$

$$P_z = 2 \cdot a \cdot \vartheta \cdot \tau_{зсув} \cdot \cos \psi_1 \cdot \cos \alpha \cdot \frac{1}{[1 - \sin(\alpha + \psi_1)]}; \quad (6)$$

$$\sigma = \cos \psi_1 \cdot \cos \alpha \cdot \frac{2 \cdot \tau_{зсув}}{[1 - \sin(\alpha + \psi_1)]}, \quad (7)$$

де  $\tau_{зсув}$  – границя міцності на зсув оброблюваного матеріалу, Н/м<sup>2</sup>.

Із залежностей (5), (6) і (7) випливає неоднозначний характер зміни параметрів  $P_y$ ,  $P_z$  і  $\sigma$  зі збільшенням кутів  $\alpha$  і  $\psi_1$ . Для залежності (6) за необхідної умови екстремуму  $(P_z)'_{\alpha} = 0$  отримано екстремальне значення кута  $\alpha = 90^{\circ} - \psi_1$ . Установлено, що в точці екстремуму параметри  $P_y$ ,  $P_z$  і  $\sigma$  наближаються до нескінченності. Це пов'язано з тим, що умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу  $\beta$  стає рівним куту  $\alpha$ . У результаті умовна площина зсуву  $OA$  (рис. 2) не перетинається з поверхнею  $BA$ , й процес стружкоутворення відсутній, має місце лише пластичне деформування матеріалу. Виходячи із цього, визначена умова здійснення процесу різання:

$$\psi_1 + \alpha < 90^{\circ}. \quad (8)$$

При цьому, кут  $\alpha$  залежить від кута  $\psi_1$ : чим він менше, тим ширше межі здійснення процесу різання. Передній кут  $\gamma$  визначається із залежності:  $\sin \gamma = (1 - a/R)$ , де  $a$  – товщина зрізу, м;  $R$  – радіус ріжучого зерна, м. Зі збільшенням товщини зрізу  $a$  кут  $\gamma$  безупинно зменшується. Це вказує на те, що при досягненні певного значення кута  $\gamma$  починає виконуватися умова (8), і процес пластичного деформування матеріалу переходить у процес різання (стружкоутворення). Отже, при різанні абразивним зерном на відміну від різання різцем (з фіксованим негативним переднім кутом  $\gamma$ ) процес стружкоутворення здійснимий у всьому можливому діапазоні зміни кута  $\alpha = 0 \dots 90^{\circ}$ . Однак, для цього необхідно попередньо досягти граничної товщини зрізу  $a_1$ , при якій відбувається перехід від пластичного деформування матеріалу до процесу різання. Виражаючи кут  $\gamma$  через відношення  $a/R$ , залежність (7) може бути представлена у вигляді

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{зсув} \cdot \cos^2 \alpha}{\sqrt{\frac{a}{2R} - \operatorname{tg} \frac{(\alpha + \psi)}{2}}}. \quad (9)$$

Очевидно, за умови

$$\sqrt{\frac{a}{2R}} - \operatorname{tg} \frac{(\alpha + \psi)}{2} = 0 \quad (10)$$

енергоємність обробки  $\sigma \rightarrow \infty$ , тому процес різання відсутній, відбувається лише пластичне деформування оброблюваного матеріалу. Граничне значення відношення  $a_1 / R$ , при якому процес пластичного деформування оброблюваного матеріалу переходить у процес різання, визначається на основі залежності (10):

$$\frac{a_1}{R} = 2 \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{(\alpha + \psi)}{2}. \quad (11)$$

Таким чином, у роботі отримана узагальнена аналітична залежність (9), що встановлює взаємозв'язок між енергоємністю обробки  $\sigma$  й відношенням  $a / R$ . Доведено, що при різанні з постійною товщиною зрізу ( $\alpha = 0$ ) енергоємність обробки  $\sigma$  завжди менша, ніж при різанні з товщиною зрізу, що збільшується в часі ( $\alpha > 0$ ). У випадку  $\alpha > 0$  перехід від пластичного деформування матеріалу до процесу стружкоутворення (різання) відбувається при більшому відношенні  $a / R$  (або більшій товщині зрізу), ніж у випадку  $\alpha = 0$ . Так, при  $\alpha = 40^\circ$  отримано  $a / R = 0,265$ , тоді як при  $\alpha = 0$  маємо  $a / R = 0$ .

У роботі, виходячи з умови  $P_z = \sigma \cdot S = HV \cdot S_0$ , з урахуванням залежності (9), визначена фактична довжина контакту зерна з оброблюваним матеріалом:

$$a_0 = \frac{\sigma_{\text{час}}}{HV} \cdot \frac{a \cdot \cos^2 \alpha}{\left[ \sqrt{\frac{a}{2 \cdot R}} - \operatorname{tg} \frac{(\alpha + \psi)}{2} \right]}, \quad (12)$$

де  $S = a \cdot v$  – площа поперечного перерізу зрізу,  $\text{м}^2$ ;  $S_0 = a_0 \cdot v$  – фактична площа контакту ріжучого зерна з оброблюваним матеріалом,  $\text{м}^2$ ;  $\sigma_{\text{час}} \approx 2\tau_{\text{зсув}}$ ,  $HV$  – тимчасовий опір і твердість оброблюваного матеріалу (по Віккерсу),  $\text{Н/м}^2$ .

Відомо, що для пластичних матеріалів відношення  $\sigma_{\text{час}} / HV$  більше, ніж для крихких матеріалів. Наприклад, для міді воно дорівнює 0,5, для нікелю – 0,53, для сирової сталі У8 – 0,43, для твердого сплаву ВК8 – 0,09, для сірого чавуну СЧ 18-36 – 0,14. Отже, для пластичних матеріалів величина  $a_0$  завжди більше, ніж для крихких матеріалів, що сприяє поліпшенню умов стружкоутворення при різанні. Тому при обробці пластичних матеріалів перехід від процесу пластичного деформування матеріалу до процесу різання відбувається при менших значеннях кута  $\alpha$ , ніж при обробці крихких матеріалів, для яких кут  $\alpha$  може приймати значення, близькі або рівні  $90^\circ$ . Це узгоджується з ві-

домими експериментальними даними досліджень струминно-абразивної обробки.

**Результати розрахунків.** При різанні зі зменшуваною в часі товщиною зрізу, як встановлено розрахунками, у залежностях (5), (6) і (7) кут  $\alpha$  необхідно розглядати негативним, рівним куту виходу абразивного зерна з оброблюваного матеріалу  $\alpha_1$ . У цьому випадку ( $\alpha < 0$ ) енергоємність обробки  $\sigma$  буде приймати менші значення в порівнянні з випадками  $\alpha = 0$  і  $\alpha > 0$  (рис. 3). Виходячи із цього зроблено висновок про те, що основний ефект струминно-абразивної обробки й відповідно абразивної обробки деталей затопленими струменями полягає в забезпеченні процесу різання зі зменшуваною товщиною зрізу, що досягається при обробці кромки заготовок, усуненні задирок і зменшенні мікронерівностей на оброблених поверхнях [6]. Це й визначає основні напрямки ефективного застосування абразивної обробки деталей затопленими струменями.

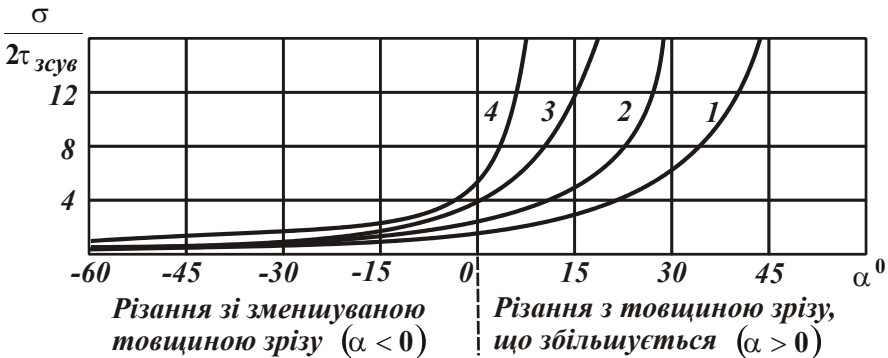


Рис. 3 – Залежність відношення  $\sigma / 2\tau_{зсув}$  від кута  $\alpha$  :

1 –  $\psi_1 = 30^\circ$ ; 2 –  $\psi_1 = 45^\circ$ ; 3 –  $\psi_1 = 60^\circ$ ; 4 –  $\psi_1 = 70^\circ$ .

У роботі теоретично обґрунтовані закономірності змінання матеріалу при струминно-абразивній обробці з кутом атаки, рівним  $90^\circ$ . Виходячи з розрахункової схеми (рис. 4), встановлено, що дотичне напруження  $\tau$ , що виникає в умовній площині зсуву  $OA$ , описується аналітичною залежністю (3) за умови  $\alpha = 0$ , тобто випадки  $\alpha = 0$  і  $\alpha = 90^\circ$  по енергоємності обробки  $\sigma$  рівносильні:

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{зсув} \cdot \cos \psi_1}{(1 - \sin \psi_1)} \quad (13)$$

У випадку  $\alpha = 0$  енергоємність обробки менше, ніж у випадку  $\alpha > 0$ . Отже, реалізуючи випадок струминно-абразивної обробки, коли кут атаки

дорівнює  $90^\circ$ , з'являється можливість зменшення енергоємності й відповідно підвищення продуктивності обробки, що свідчить про ефективність застосування даної схеми для обробки деталей з відносно крихких матеріалів, схильних до стружкоутворення. Це ще одне підтвердження того, що струминно-абразивну обробку й відповідно абразивну обробку затопленими струменями деталей із пластичних матеріалів з точки зору підвищення продуктивності ефективно виконувати з невеликими кутами атаки (на рівні  $10^\circ - 30^\circ$ ), а обробку деталей з крихких матеріалів – з більшими кутами атаки, рівними або близькими  $90^\circ$ .

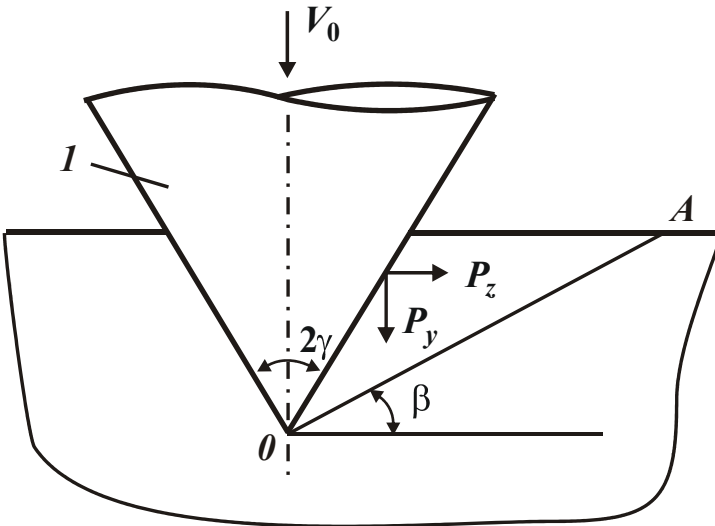


Рис. 4 – Розрахункова схема параметрів обробки для випадку  $\alpha = 90^\circ$ :  
1 – зерно у формі конуса.

Це узгоджується з відомими експериментальними даними, отриманими при дослідженні традиційних методів струминно-абразивної обробки, і свідчить про вірогідність отриманих теоретичних рішень. На основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень розроблено ефективне устаткування. Їхнє застосування виключає трудомісткі ручні зачисні операції, підвищує якість, продуктивність і стабільність обробки за рахунок поліпшення товарного вигляду оброблених деталей і одночасної обробки великої кількості деталей, завантажених у робочу камеру *навалом*.

**Перспективи подальших досліджень.** Автор вважає перспективними напрямки досліджень, пов'язані зі створенням математичної моделі визначення шорсткості поверхні з урахуванням динаміки руху абразивних зерен в

оброблюваному матеріалі. Це дозволить аналітично описати траєкторії руху абразивних зерен у процесі обробки й принципово, по-новому, обґрунтувати основні технологічні закономірності знімання матеріалу й формоутворення поверхонь деталей. Важливо також провести експериментальні дослідження швидкості руху абразивних зерен при використанні різних по конструктивному виконанню сопел, в тому числі *сопла Лаваля*, яке забезпечує надзвукову швидкість витікання стисненого повітря.

**Висновки.** Розроблено теоретичний підхід до визначення технологічних закономірностей формування параметрів якості та продуктивності при абразивній обробці деталей затопленими струменями. З умови рівності кінетичної енергії абразивного зерна, що рухається, і роботи різання доведено, що основними напрямками підвищення ефективності обробки є зменшення енергоємності обробки. Розроблено нову математичну модель визначення енергоємності обробки з урахуванням різних форм мікрорізів: з постійною товщиною та з товщиною зрізу, що збільшується й зменшується в часі. Доведено, що найменша енергоємність досягається при мікрорізанні зі зменшуваною в часі товщиною зрізу. Це вказує на те, що найбільш ефективною областю застосування методу абразивної обробки затопленими струменями є обробка кромки заготовок, усунення задирок і зменшення мікронерівностей на оброблених поверхнях дрібних деталей.

**Список літератури:** 1. *Проволоцкий А.Е.* Струйно-абразивная обработка деталей машин. – К.: Техніка. – 1989. – 177 с. 2. *Шманев В. А.* Струйно-абразивная обработка деталей ГТД / *В. А. Шманев, А. П. Шулепов, А. В. Мецераков.* – М.: Машиностроение. – 1995. – 143 с. 3. *Исупов М. Г.* Разработка, исследование технологии струйно-абразивной финишной обработки: дис. на соискание научн. степени докт. техн. наук. 05.02.08 Технология машиностроения / *Исупов Максим Георгиевич.* – М.: РГБ. – 2007. – 432 с. 4. *Зверев Е. А.* Влияние режимов струйно-абразивной обработки на шероховатость поверхности деталей под плазменное напыление покрытий / *Е. А. Зверев* // *Материаловедение: сб. науч. тр. – Новосибирск: Новосиб. гос. техн. ун-т. – 2008. – № 2 (52). – С. 109 – 114.* 5. *Цыгановский А. Б.* Технологические возможности гидроабразивной обработки затопленными струями / *А. Б. Цыгановский* // *Вибрации в технике и технологиях. – Ростов-на-Дону: ДГТУ. – 2010. – № 2(58). – С. 205 – 215.* 6. *Андилахай А. А.* Абразивная обработка деталей затопленными струями / *А. А. Андилахай.* – Мариуполь: ПГТУ, 2006. – 190 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Provolotsky, A. E.* *Struyno-abrazivnaya obrabotka detaley mashyn.* Kiev: Tekhnika. 1989. Print. 2. *Shmanev, V. A., A. P. Shulepov and A. V. Mesheryakov.* *Struyno-abrazivnaya obrabotka detaley GTD.* Moscow: Mashinostroenie. 1995. Print. 3. *Isupov, M. G.* *Razrabotka, issledovanie tekhnology struyno-abrazivnoy finishnoy obrabotki. Dis. na soiskanie nauchn. stepeni d-ra. tekhn. Nauk.* Moscow: RGB. 2007. Print. 4. *Zverev, E. A.* "Vliyanie rezhimov struyno-abrazivnoy obrabotki na sherokhovatost poverkhnosti detaley pod plazmennoe napylenie pokrytyy." *Sb. nauch. trudov. "Materialovedenie."* No. 2 (52). Novosibirsk: Novosibir. gos. tekhn. un-t, 2008. 109–114. Print. 5. *Tsyganovskiy, A. B.* "Tekhnologicheskie vozmozhnosti gidroabrazivnoy obrabotki zatoplennymi struyami." *Vibratsii v tekhnike i tekhnologiyakh.* No. 2 (58). Rostov-na-Donu: DGТУ, 2010. 205–215. Print. 6. *Andilakhay, A. A.* *Abrazivnaya obrabotka detaley zatoplennymi struyami.* Mariupol: PGТУ, 2006. Print.

*Надійшла (received) 29.05.2014*