

УДК 621.002.3: 621.89

А.П. Гавриш д.т.н., проф., П.О. Киричок д.т.н., проф.,  
Т.А. Роїк д.т.н., проф., Ю.Ю. Віцюк, к.т.н.  
Національний технічний університет України «КПІ», Україна  
Тел./факс: 097-952-18-59  
E-mail: [roik2011@gmail.com](mailto:roik2011@gmail.com); [yuliav@bigmir.net](mailto:yuliav@bigmir.net)

## ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ ПРИ ПРЕЦИЗІЙНІЙ МАШИННІЙ ДОВОДЦІ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ДЕТАЛЕЙ ЗІ ЗНОСОСТІЙКИХ АЛЮМІНІЄВИХ КОМПОЗИТИВ ДЛЯ ПОЛІГРАФІЧНОЇ ТЕХНІКИ

*В статті наведені результати дослідження впливу технологічних факторів прецизійної машинної доводки плоских поверхонь деталей поліграфічних машин з композитів на основі алюмінію на залишкові напруження їх поверхневих шарів. Встановлені залежності рівня значень та глибини залягання залишкових напружень від режимів різання (питомого тиску при доводці, швидкості різання), матеріалу та зернистості абразивних мікропорошків, типу матеріалу для доводочного притиру, складу мастильно-охолоджуючої рідини. Розроблено практичні рекомендації для промисловості.*

**Ключові слова:** *прецизійна механічна доводка, плоскі поверхні деталей, алюмінієві композити, залишкові напруження, режими різання, абразивні мікропорошки, матеріал доводочного притиру, якість поверхонь.*

### Постановка задачі

У конструкціях новітнього обладнання поліграфічної галузі набули широкого розповсюдження зносостійкі композиційні матеріали, які одержані з цінної та дешевої сировини – промислових шліфувальних відходів кольорових металів, насамперед, алюмінієвих сплавів та які, на жаль, у теперішній час, здебільше вивозяться у відвали і не використовуються у повторному циклі виробництва.

На основі розгалужених науково-дослідних робіт з регенерації та повторного використання у виробничому циклі цих сировинних ресурсів [1, 2] в останні роки були створені оригінальні високозносостійкі композиційні матеріали на основі алюмінію АК12М2МгН, АМ4,5Кд, АК8МЗч та АК12ММгН+(9-12%)MoS<sub>2</sub> [3 - 6]. Вони пройшли всебічну перевірку в умовах дії агресивного оточуючого середовища (кисень, повітря, виробничий пил, температурні навантаження при експлуатації у межах 100 – 170 °С, питомі навантаження – до 7 МПа) і широко застосовуються для виготовлення деталей тертя (скоби, затли, направляючі, плоскі вкладні “пальців” захоплювачів автооператорів, підтримувачі конвеєрних систем) у ножових різальних машинах поліграфії типу Wolenberg Trim-tec 560, у висі кальному обладнанні паперу та картону типів Drossertst - 6, Bobsmistral – 110 А2.

Деякі основні властивості нових зносостійких композиційних матеріалів на основі шламових відходів алюмінієвих сплавів наведені у табл. 1.

Зносостійкий матеріал на основі відходів алюмінієвого сплаву АК12ММгН з домішками твердого мастила (дисульфід молібдену MoS<sub>2</sub>) набув визнання у конструкторів і наразі широко використовується у вузлах тертя машин і механізмів, що працюють при підвищених навантаженнях і температурах без змащування рідким мастилом.

Таблиця 1. Фізико-механічні та антифрикційні властивості нових композитів на основі відходів алюмінієвих сплавів

Властивості композитів	AK12M2MgH [3]	AM4,5Kд [4]	AK8M3ч [5]	AK12MMgH+(9-12)%MoS <sub>2</sub> [6]
Межа міцності на розтяг, МПа	180 - 185	187 - 190	187 - 195	190 - 197
Твердість НВ, МПа	550 - 570	580 - 600	590 - 610	595 - 615
Коефіцієнт тертя при 5 МПа	0,18 – 0,30	0,22 – 0,34	0,25 – 0,35	0,27 – 0,37
Інтенсивність зношування при 5 МПа	3,9*	5,3*	2,66 – 2,69**	2,61 – 2,65
Інтенсивність зношування контртіла при 5 МПа	сліди	0,005*	0,002**	сліди
Гранична температура, °С	120	170	150	155
Граничне навантаження, МПа	7	7	6**	6,5**

Примітка: \* випробування при 100 °С; \*\* - випробування при 150 °С; змащування індустріальним мастилом «І - 20» в парі з контртілом зі сталі 45 (45 – 48 HRC).

У зв'язку з тим, що нові композиційні сплави на основі алюмінію знайшли своє використання у машинобудуванні та приладобудуванні відносно нещодавно, розгалужених та всебічних досліджень процесів їх тонкого абразивного оброблення до цього часу практично немає. Зроблено лише перші кроки у цьому напрямку, зокрема, є поодинокі публікації, присвячені дослідженню впливу складу інструменту та режимів різання на параметри шорсткості поверхонь при тонкому шліфуванні [5 - 7].

Виходячи із загальних положень теорії абразивного оброблення матеріалів [8 - 12] та враховуючи специфічні властивості композитів на основі алюмінію [1 - 2], безумовно доцільною є обробка плоских високоточних поверхонь деталей тертя з алюмінієвих композиційних сплавів, синтезованих з відходів вторинної алюмінієвої сировини, за технологічною схемою – «тонке плоске ельборове шліфування – прецизійна механічна доводка». Така схема оброблення гарантує отримання необхідних вимог до поверхонь тертя композитних деталей, які є засадничими для забезпечення високих параметрів надійності пар тертя (зносостійкості, довговічності, ремонтоздатності та коефіцієнта готовності). Наприклад, для прецизійних опор конвеєрно-накопичувальних систем поліграфічних комплексів, ці вимоги становлять такі значення: параметр шорсткості поверхні  $R_a$  повинен бути не вище 0,020 – 0,040 мкм, не площинність поверхонь оброблення на базі 60 ? 60 мм – у межах 0,05 – 0,08 мкм, ступінь наклепу  $K$  – не більше 1,4 – 1,5, а глибина наклепу  $h$  повинна мати мінімальні значення при деформації металу поверхневого шару деталі і не перевищувати значень 2 – 5 мкм.

Згідно фундаментальним дослідженням з теорії тертя і зношування деталей пар тертя [13], для підвищення показників зносостійкості бажаним є створення методами тонкого оброблення у поверхневих шарах деталей залишкових напружень стиску.

На сьогодні, на жаль, у літературних джерелах майже відсутня інформація щодо технологічних процесів фінішної обробки деталей з нових марок [3, 4] композиційних матеріалів на основі алюмінію. Є лише перші спроби досліджень у цьому напрямку [7, 15, 16] (створені технологічні рекомендації по тонкому абразивному ельборовому шліфуванню та прецизійній доводці). Проте детального

вивчення утворення залишкових напружень поверхневих шарів деталей при їх обробленні до цього часу немає, хоча, як вже зазначалось, вони відіграють (поряд з параметрами шорсткості та наклепу) важливу роль для отримання необхідних показників зносостійкості. Це не дозволяє оптимізувати технологічні процеси фінішної доводки поверхонь деталей з нових композитів на основі алюмінію, веде до створення на підприємствах поліграфічного машинобудування різних технологічних схем обробки, далеко не завжди достатньо обґрунтованих і часто – досить протирічних.

Тому дослідження питань утворення залишкових напружень у поверхневих шарах деталей з нових зносостійких алюмінієвих композитів, створення відповідних технологічних регламентів і рекомендацій для виробництва є безумовно актуальним і має не тільки наукове, а і, що не менш важливо, практичне значення.

Метою даної роботи, результати якої викладено у статті, було виконання експериментального дослідження залишкових напружень у поверхневому шарі оброблення при прецизійній машинній доводці поверхонь деталей тертя поліграфічних машин, що виготовлені з нових композиційних матеріалів на основі шламів відходів алюмінієвих сплавів АК12М2МгН, АК12ММгН, АК8МЗч, АК12ММгН+(9 – 12%)MoS<sub>2</sub> та встановлення впливу основних технологічних факторів прецизійної абразивної машинної доводки на залишкові напруження, їх знак та глибину проникнення у поверхневий шар оброблення деталі.

**Результати досліджень.** Дослідження залишкових напружень виконувалось згідно з методикою, наведеною у роботах [2, 5, 6, 9], при цьому постійно брались до уваги результати теоретичного дослідження формування залишкових напружень, які були виконані авторами і опубліковані у роботах [8, 16].

Згідно сучасного уявлення щодо формування залишкових напружень у поверхневому шарі деталей при механічній обробці взаємодіє два протилежних фактори – силовий і тепловий вплив інструменту на виріб.

Пластична деформація від нормальних сил різання веде до зміцнення поверхневого шару і появи стискуючих напружень, а високі температури у зоні різання викликають локальні термопластичні деформації і, відповідно, появу залишкових напружень розтягу.

Залишкові напруження, що виникають при прецизійній машинній доводці деталей, суттєво впливають на глибину їх залягання, а отже, на параметри інтенсивності зношування поверхні.

Розрахунок рівня залишкових напружень виконувався згідно методики, наведеної у роботах [8, 16].

Зазначимо, що враховуючи дані попередньо наведених досліджень з вивчення якості поверхонь з застосуванням різних методів машинної доводки, а саме, що найкращі результати по виконанню технічних вимог до поверхонь оброблення деталей з високозносостійких алюмінієвих композитів забезпечуються застосуванням притирочних дисків з чавуну, абразивних мікропорошків зернистістю 1 – 3 мкм з електрокорунду хромчастого (З3А) з вмістом у його складі до 2% оксиду хрому CrO та мастильно-охолоджуючої рідини зі складом гас (~ 65%) + олеїнова кислота (~35%) [15]. Більшість експериментів, що наведені у даній статті, виконана з урахуванням наведених рекомендацій на зразках з композиційних сплавів АК12ММгН+(9–12%)MoS<sub>2</sub>.

Для порівняння були використані інші типи притирів та матеріалів абразивних мікропорошків. На рис. 1 представлено розподіл залишкових напружень за глибиною поверхневого шару.

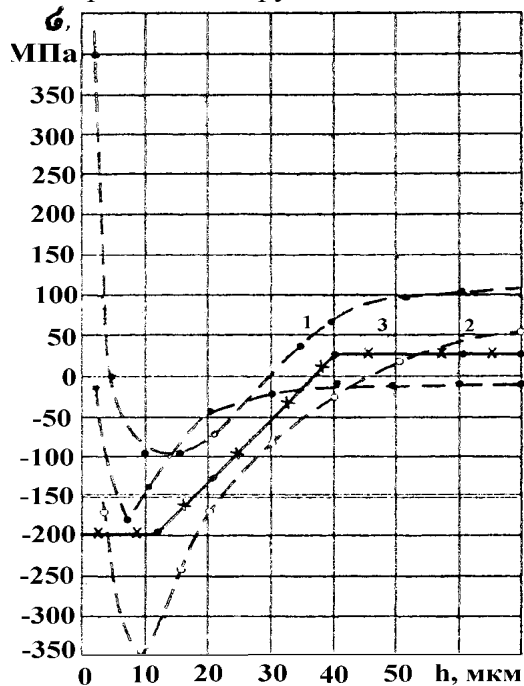


Рис. 1. Розподіл залишкових напружень за глибиною поверхневого шару при прецизійній механічній доводці деталей з алюмінієвих композитів типу АК12ММгН+(9 – 12%)MoS<sub>2</sub> при різних методах доводки: 1 – доводка мікропорошками монокорунду (43А) зернистістю 3 мкм; 2 – доводка мікропорошками електрокорунду хромчастого (33А) зернистістю 5 мкм; 3 – доводка мікропорошками електрокорунду хромчастого (33А) зернистістю 3 мкм

Аналіз наведених на рис. 1 експериментальних даних показує, що при прецизійній машинній доводці (у всьому діапазоні досліджень) утворюються залишкові напруження стиску, які мають глибину проникнення у поверхневий шар деталі оброблення до 10 – 15 мкм. Напруження стиску сприяють збільшенню параметрів зносостійкості [8, 12] і тому, отримані результати дозволяють дійти висновків, що для суттєвого збільшення термінів довговічності деталей та машин в цілому є, безумовно, корисним застосовувати для фінішних операцій оброблення поверхонь машинну доводку на чавунних дисках абразивними дрібнозернистими (~ 3 мкм) порошками електрокорунду хром частого (33А) з використанням мастильно-охолоджуючої рідини зі складом – гас (~ 65%) + олеїнова кислота (~35%). Це дозволяє отримати (окрім бажаних попередньо розрахованих залишкових напружень стиску) необхідні значення параметрів шорсткості  $R_a$ , глибини, ступеню наклепу та геометричної точності поверхонь оброблення.

Також доцільно зазначити, що глибина залягання максимальних значень напружень стиску і їх величина, отримані шляхом розрахунків [8, 16], добре узгоджується з експериментальними даними, що свідчить про достовірність отриманих даних.

Для технологічної практики реального виробництва безумовно важливими є дослідження впливу режимів різання машинної доводки на залишкові напруження поверхневих шарів деталей з новітніх марок зносостійких алюмінієвих композитів.

Деякі основні результати таких досліджень наведені у табл. 2.

Аналіз наведених даних показує, що режими різання при прецизійній машинній доводці (швидкість різання  $V_p$ , питомий тиск  $P$ ) у досить широкому діапазоні їх змін суттєво впливають на рівень залишкових напружень  $\sigma$  та глибину залягання  $h$  у поверхневому шарі деталей оброблення. Відзначається тенденція до зростання

залишкових напружень зі збільшенням швидкості різання  $V_p$  (на 12 – 15%) та питомого тиску  $P$  (на 15 – 17%). Пояснення цьому може бути надано з урахуванням динаміки процесу різання при доводці: за наявності складної траєкторії переміщення у зоні обробки ріжучих абразивних зерен зміна швидкості різання  $V_p$  і, особливо, питомого тиску  $P$  обумовлює більше заглиблення вершини ріжучого зерна у поверхню оброблення. Це обумовлює збільшення перерізу стружки і, відповідно, перерозподіл складових сил різання на поверхні деталі. Отже, змінюються умови різання і, як результат, викликає зростання залишкових напружень.

Таблиця 2. Залежність залишкових напружень поверхневих шарів деталей від режимів різання при прецизійній машинній доводці

Спосіб машинної доводки	Режими різання		Залишкові напруження	
	Швидкість різання $V_p$ , м/хв	Питомий тиск $P$ , МПа	На поверхні деталі $\sigma$ , МПа	Глибина залягання $h$ , мкм
Притир-чавун Абразив-електрокорунд хромчастий 33А Зернистість – 3 мкм	5	0,05	200	8
		0,07	215	9
		0,10	225	11
	7	0,05	250	10
		0,07	260	11
		0,10	270	12
	10	0,05	270	12
		0,07	280	14
		0,10	300	15
Притир – скло «Пірекс» Абразив – електрокорунд хромчастий 33А Зернистість – 3 мкм	5	0,05	230	10
	7		290	15
	10		330	17

Примітка: 1. Мастильно-охолоджуюча рідина - гас (~ 65%) + олеїнова кислота (~35%) + олеїнова кислота (~35%); 2. Матеріал оброблюваної деталі-алюмінієвий композит АК12ММгН+(9 – 12%)MoS<sub>2</sub>

Як вже відзначалось, таке зростання залишкових напружень стиску та глибини їх залягання у поверхневий шар сприяє збільшенню зносостійкості поверхні і здавалося б, що це є безумовно позитивним явищем. Проте, якщо враховувати, що при цьому суттєво зростає шорсткість поверхні [15] (відповідно, значно погіршуються умови тертя і різко знижуються параметри довговічності), слід підходити до призначення режимів різання уважно, оптимізуючи їх вибір з метою досягнення найкращих результатів за параметрами якості поверхонь оброблення, продуктивності процесу різання та забезпеченню вимог зносостійкості деталей.

Для новітніх зносостійких композитних матеріалів на основі відходів алюмінієвих сплавів [3, 4] доцільно виконувати прецизійну доводку за такими режимами оброблення: швидкість різання  $V_p = 5 - 7$  м/хв., питомий тиск  $P = 0,05 - 0,07$  МПа.

Слід зазначити, що ці висновки підтверджуються і при застосуванні для доводки більш твердих скляних притирів. Найвірогідніше пояснити їх можливо тим, що використання у якості притирів, наприклад «Пірекс», яке відрізняється високою твердістю, обумовлює зростання сил різання і, як наслідок, веде до відповідного збільшення залишкових напружень та глибини їх залягання.

Використання для прецизійної машинної доводки притирів з чавуну, яким притаманна наявність на поверхні вкраплень глобулярної форми вуглецю, дозволяє ріжучим абразивним зернам (внаслідок дії складових сил різання) дещо зануритись у глобулярну частку вуглецю. Це у першому наближенні схоже на мікродемпфування ріжучих зерен у тіло притиру і веде до деякого зменшення ефективного перерізу стружки, що зрізується з поверхні оброблення. Отже, умови для різання в процесі машинної доводки суттєво покращуються, що позитивно впливає на отримання необхідних параметрів якості оброблюваних поверхонь деталей зі зносостійких композиційних матеріалів на основі алюмінію.

Таким чином, найкращим матеріалом притирів, що застосовують для прецизійної машинної доводки, є глобулярний чавун. Це цілком співпадає з базовими положеннями теорії абразивного оброблення і, зокрема, теорії процесів надтонкої абразивної доводки [8, 10, 12].

**Висновки.** Вперше досліджено залишкові напруження поверхневих шарів оброблюваних деталей при прецизійній машинній доводці нових зносостійких композитних матеріалів на основі алюмінію. Доведено, що на рівень та глибину залишкових напружень суттєво впливають режими різання (швидкість  $V_p$ , питомий тиск  $P$ ) та матеріал притиру. Найкращі результати параметрів якості оброблюваних поверхонь (з точки зору утворення залишкових напружень стиску) забезпечує застосування у якості ріжучих абразивів дрібнозернистих (зернистістю 1 – 3 мкм) мікропорошків з електрокорунду хромчастого 33А зі умістом в його складі до 2% оксиду хрому  $CrO$ , доводочних притирів з чавуну та виконання технологічного процесу прецизійної машинної доводки з такими режимами різання: швидкість різання  $V_p = 5 - 7$  м/хв., питомий тиск –  $P = 0,05 - 0,07$  МПа, мастильно-охолоджуюча рідина зі складом - гас (~ 65%) + олеїнова кислота (~35%).

Подальші дослідження щодо механізму утворення залишкових напружень доцільно проводити у напрямку вивчення впливу на процес їх формоутворення взаємодії миттєвих контактних температур на ріжучому лезі абразивного зерна та силового поля при різанні надтонких стружок.

#### **Список літератури:**

1. Роїк Т.А. Композиційні підшипникові матеріали для підвищених умов експлуатації / Т.А.Роїк, П.О.Киричок, А.П.Гавриш// Монографія. - К.: НТУУ „КПІ”, 2007.- 404 с.
2. Патент України № 60174 А, МКИ С22С 21/02 Порошковий антифрикційний матеріал на основі алюмінію / Комнацький О.Л., Роїк Т.А., опубл. 15.09.2003, Бюл. № 9.
3. Патент України № 34407, МКИ С22С21/02 Композиційний підшипниковий матеріал на основі алюмінію / Роїк Т.А., Гавриш А.П., Гавриш О.А., Холявко В.В., Прохоренко О.М., опубл. 11.08.08, Бюл. № 15.
4. Патент України № 75523, МПК С22С21/02 (2006.01) Зносостійкий матеріал на основі алюмінієвого сплаву / Роїк Т.А., Гавриш А.П., Гавриш О.А., Киричок П.О., Віцюк Ю.Ю., опубл. 10.12.2012, Бюл. № 23.
5. Гавриш А.П. Вплив абразивного інструменту на шорсткість поверхонь композитних підшипників поліграфічної техніки при тонкому шліфуванні / Гавриш А.П., Шевчук А.В., Роїк Т.А., Ковальов В.А., Віцюк Ю.Ю. // Технологія і техніка друкарства. - № 3 (37). – 2012. – С. 119 – 127.

6. Гавриш А.П. Нові технології фінішного оброблення композиційних підшипників ковзання для жорстких умов експлуатації / А.П. Гавриш, О.О. Мельник, Т.А. Роїк, М.Г. Аскеров, О.А. Гавриш // Монографія. – К.: НТУУ „КПІ”, 2012. – 196 с.
7. Гавриш А.П. Розробка технологічних режимів тонкого абразивного шліфування зносостійких деталей поліграфічної техніки з нових композитів на основі алюмінію // Технологічні комплекси. - № 1 (9), 2014. – С. 75 – 87.
8. Гавриш А.П. Фінішна алмазно-абразивна обробка матеріалів / А.П. Гавриш, П.П. Мельничук: Монографія. – ЖДТУ, 2004. – 551 с.
9. Ящерицын П.И. Прогрессивная технология финишной обработки деталей / П.И. Ящерицын. – Минск: Беларусь, 1989. – 312 с.
10. Кремень З.И. Абразивная доводка / З.И. Кремень, А.И. Павлючук. – Л.: Машиностроение, 1967. – 116 с.
11. Кремень З.И. Применение новых видов микропорошков для окончательно-плоскопараллельных концевых мер длины / З.И. Кремень. – Абразивы, № 61, 1981. – С. 45 – 52.
12. Соколов С.П. Тонкое шлифование и доводка / С.П. Соколов. – М.: Машгиз, 1981. – 296 с.
13. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1968. – 478 с.
14. Гавриш А.П. Тонке ельборове шліфування деталей тертя з композитів на основі алюмінію для машинних комплексів // А.П. Гавриш, Т.А. Роїк, І.Є. Дорфман. - Вісник КНУТД. - № 2, 2014. – С. 91 – 99.
15. Гавриш А.П. Прецизійна машинна доводка плоских поверхонь деталей тертя з композитів на основі алюмінію для технологічних комплексів / А.П. Гавриш, Т.А. Роїк, І.Є. Дорфман, Ю.Ю. Віцюк. – Вісник КНУТД. - № 3, 2014. – С. 110 – 119.
16. Гавриш А.П. Формування залишкових напружень поверхневих шарів тертя композитних підшипників поліграфічних машин при тонкому абразивному шліфуванні / А.П. Гавриш, П.О. Киричок, Т.А. Роїк, Ю.Ю. Віцюк. – Технологія і техніка друкарства. - № 1, 2013. – С. 64 – 75.

Надійшла до редколегії 12.05.2014 р.

**А.П. Гавриш, П.А. Киричок, Т.А. Роїк, Ю.Ю. Віцюк**

#### **ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ПРЕЦИЗИОННОЙ МАШИННОЙ ДОВОДКЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ИЗНОСОСТОЙКИХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ ПОЛИГРАФИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

*В статье приведены результаты исследования влияния технологических факторов прецизионной доводки плоских поверхностей деталей полиграфических машин из композитов на основе алюминия на остаточные напряжения в их поверхностных слоях. Установлены зависимости уровня величин и глубины залегания остаточных напряжений от режимов резания (удельного давления при доводке, скорости резания), материала и зернистости абразивных микропорошков, типа материала для доводочного притира, состава смазочно-охлаждающей жидкости. Разработаны практические рекомендации для промышленности.*

**Ключевые слова:** прецизионная механическая доводка, плоские поверхности деталей, алюминиевые композиты, остаточные напряжения, режимы резания, абразивные микропорошки, материал доводочного притира, качество поверхностей.

**A.P. Gavrish, P.O. Kyrychok, T.A. Roik, Yu.Yu. Vitsuk**

**RESIDUAL TENSIONS AT PRECISION SMOOTHING OF PARTS' SURFACE LAYERS FROM WEAR-RESISTANCE COMPOSITES FOR PRINTING EQUIPMENT**

*In the article the research results of the influence of technological factors at precision smoothing of plane surfaces of printing machines parts from composites based on aluminium to residual tensions in their surface layers have been presented. The regularities of the value and depth of residual tensions location from cutting parameters (specific pressure at smoothing, cutting speed), material and granulosity of abrasive micropowders, type of material for smoothing lapping tool, composition of lubricoolant have been determined. It was developed the practical recommendations for industry.*

**Key words:** *precision smoothing, plane surfaces of parts, aluminium composites, residual tensions, cutting parameters, abrasive micropowders, material of smoothing lapping tool, surface quality.*