

во «Лань», 2002. – 768 с.

12. **Бондаренко А.А., Дубінін О.О., Переяславцев О.М.** Теоретична механіка: Підручник: У 2 ч. – Ч. 1: Статика. Кінематика. – К.: Знання, 2004. – 599 с. – (Вища освіта ХХІ століття).

13. **Дронг В.И.** Курс теоретической механики. Учебник для вузов / **В.И. Дронг, В.В. Дубинин, М.М. Ильин и др.** Под общей ред. **К.С. Колесникова**. 3-е изд. стереотип. – М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 736 с.

14. **Гулівець О.А., Олійник С.Ю., Маркевич Г.А.** Векторні функції скалярного аргументу при дослідженнях кінематики точки та твердого тіла. Вісник Черкаського університету. Серія фізико-математичні науки, 2017, № 1. – С. 138-146.

Рукопис подано до редакції 19.04.2018

УДК 621.9.04:533.9: 621.791.947.55

**В.П. НЕЧАЄВ, А.О. РЯЗАНЦЕВ**, кандидати техн. наук, доценти, **О.О. СОЛОДУН**, магістрант  
Криворізький національний університет

## **ВПЛИВ СИЛОВОГО І ТЕПЛОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ ЗУБА ФРЕЗИ НА СТІЙКІСТЬ ЛЕЗА ПРИ ПЛАЗМОВО-МЕХАНІЧНОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ**

**Мета.** Метою даної роботи є вдосконалення технології обробки деталей з важкооброблюваних матеріалів, а саме – дослідження та наукове обґрунтування параметрів процесу плазмово-механічного фрезерування поверхонь деталей з легованих сталей для підвищення продуктивності обробки, забезпечення необхідної стійкості робочої частини різального інструменту.

**Методи дослідження.** Результати роботи отримані шляхом теоретичних і експериментальних досліджень. Теоретичні дослідження полягають у визначенні параметрів теплового поля заготовки при плазмовому нагріванні в умовах плазмово-механічного фрезерування. Експериментальні дослідження засновані на комплексному вивченні взаємозв'язку основних показників фрезерування з факторами попереднього плазмового нагрівання припуску.

**Наукова новизна.** У результаті проведених досліджень були отримані дані про температурні поля в матеріалі заготовки при нагріванні плазмовою дугою, що сканує одночасно в двох напрямках щодо вектору хвилинної подачі. Виявлене падіння інтенсивності навантаження передньої поверхні ріжучого клину по всьому шляхові контакту зуба фрези із заготовкою, у порівнянні з обробкою без нагрівання. Вивчені особливості зношування ріжучого лека та умови виникнення та розвитку округлення ріжучої крайки, виведені залежності, що визначають зв'язок стійкості інструмента з режимами нагрівання й різання в конкретних умовах плазмово-механічного фрезерування.

**Практичне значення.** Розроблений процес плазмово-механічного фрезерування та рекомендації з вибору параметрів нагрівання й різання дозволяють в 2... 4 рази збільшити продуктивність обробки заготовок зі середньо легованих сталей і титанових сплавів при збереженні стійкості ріжучої частини інструмента.

**Результати.** Встановлено, що попереднє плазмове нагрівання при фрезеруванні площини забезпечує протікання специфічного термічного циклу в матеріалі припуску, у результаті чого змінюються твердість і пластичність оброблюваного матеріалу. Зміна механічних властивостей припуску приводить до зниження питомих навантажень на ріжучий клин, до зниження інтенсивності його адгезійного зношування й тендітного руйнування, до його округлення, що позитивно позначається в цілому на стійкості інструмента.

**Ключові слова:** плазмове нагрівання, фрезерування, ріжучий клин, навантаження, стійкість.

doi: 10.31721/2306-5451-2018-1-47-149-153

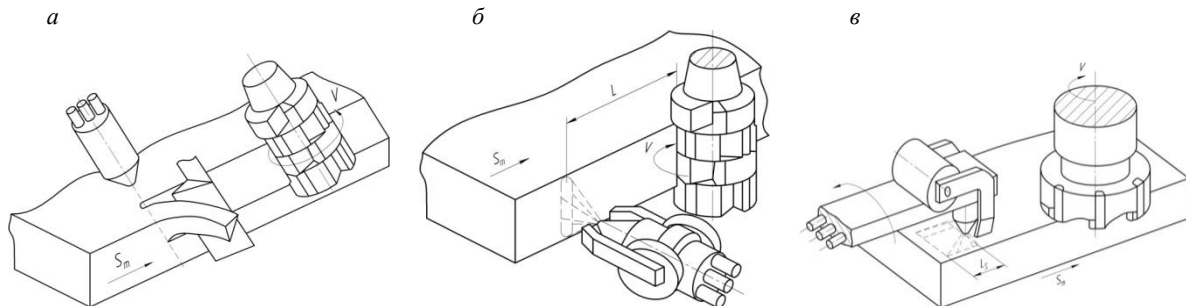
**Проблема і її зв'язок з науковими і практичними завданнями.** Розвиток машинобудування вимагає від вчених і інженерів пошуку нових вискоелективних методів обробки металу, створення надійних технологічних процесів і найбільш ефективного застосування їх в виробничих умовах. Одним з таких процесів є плазмово-механічна обробка (ПМО). З'явившись в кінці 60-х років минулого століття, вона до цих пір є предметом вивчення, в наукових лабораторіях, розкриваються її нові можливості та перспективи. ПМО - досить складний процес, кількість керованих параметрів якого велике, що ускладнює ефективно застосовувати процес без попередніх досліджень для визначення раціональних режимів обробки.

Це особливо відноситься до плазмово-механічного фрезерування (ПМФ). Аналіз літературних джерел по проведених лабораторним дослідженням виявив раціональні схеми процесу ПМФ, області їх застосування, що дозволило визначити коло технологічних проблем, що вирішуються при цьому процесі, рекомендувати його впровадження на конкретних операціях [1, 7, 12, 13].

Висока ефективність плазмово-механічного фрезерування робить актуальними подальші розробки, спрямовані на пошук нових способів застосування плазмової дуги для поверхневого

нагріву, зменшення припуску при фрезеруванні, що дозволило б значно підвищити продуктивність обробки важкооброблюваних матеріалів [8-11].

**Аналіз досліджень і публікацій.** Різноманіття процесів фрезерування з широким спектром впливу плазмової дуги на оброблюваний матеріал породило велику кількість схем плазмово-механічного фрезерування, що підтверджується наявністю публікацій і патентів на різні схеми ПМФ [2-4]. Однак випробування показали, що багато із запропонованих способів не можуть бути використані через низьку технологічну надійність. Лабораторні дослідження і досвід промислового впровадження дозволяють рекомендувати три схеми ПМФ, ефективність і надійність яких доведені (рис.1).



**Рис.1.** Різновиди схем плазмово-механічного фрезерування:  $S_m$  – хвилинна подача;  $V$  – швидкість обертання фрези;  $L$  – відстань між фрезою та плазмотроном;  $L_s$  – довжина опорної плями нагрівання

Висока концентрація енергії плазмової дуги дає можливість використовувати її як високо-ефективний інструмент видалення (відрізки або сплавлення) основної частини припуску [3]. Однак реалізація даного способу вимагає істотної модернізації приводу подачі фрезерного верстата, устаткувати його додатковими захисними пристроями столу верстата.

Застосування електромагнітного сканування плазмової дуги щодо оброблюваної поверхні призвело до створення регульованого по інтенсивності і площі джерела нагріву, що дає можливість реалізувати схеми ПМФ як при циліндричному, так і при торцевому фрезеруванні з нагріванням зони врізання зуба. Найбільш ефективно застосування цього способу при обробці кромки листових заготовок з обробленням під зварювання (рис.1 а, б). При цьому, зниження інтенсивності плазмового нагріву, завдяки використанню електромагнітного сканування дуги, різко знижує утворення шкідливих аерозолів, а також запобігає оплавленню поверхні заготовки.

Подальше розширення зони плазмового нагріву, необхідне умовами торцевого фрезерування, можливо за рахунок механічного сканування плазмової дуги щодо оброблюваної поверхні (рис.1 в) [5, 6].

Оскільки термічний цикл поверхневих шарів заготовки при плазмовому нагріванні, внаслідок структурно-фазових перетворень, істотно змінює їх фізико-механічні властивості в сторону зменшення, з'являється можливість значно підвищити продуктивність обробки, забезпечуючи при цьому необхідну стійкість різального інструмента [14, 15].

**Постановка задачі.** Оскільки в спеціальній літературі практично відсутня структурована інформація про особливості зношування ріжучої частини фрез при ПМФ, прийнято за доцільне заповнити відсутню інформацію по даному напрямку. Таким чином, метою даної роботи є вдосконалення технології обробки деталей з важкооброблюваних матеріалів, а саме – дослідження та наукове обґрунтування параметрів процесу плазмово-механічного фрезерування поверхонь деталей з легуваних сталей для підвищення продуктивності обробки, забезпечення необхідної стійкості робочої частини різального інструменту.

Сформульована мета роботи обумовила необхідність дослідження особливостей контактних процесів в зоні різання, в тому числі – силового і теплового навантаження зубів фрези.

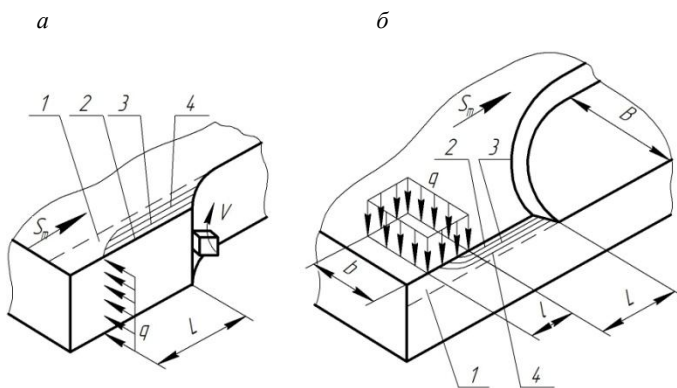
**Виклад матеріалу і результати.** Стійкість твёрдосплавного інструменту при фрезеруванні важкооброблюваних матеріалів часто визначається крихким руйнуванням і викришуванням різальних кромки, що обумовлено високим тиском на контактних ділянках леза фрези. Плазмовий нагрів, як вказувалося, знижує твердість матеріалу припуску в кілька разів. Величина середнього тиску на передній поверхні ріжучого клина задовільно корелює з динамічною твердістю матеріалу припуску

$$\sigma_{Ncp} \approx 0,2 H_o, \quad (1)$$

де  $H_0$  – твердість динамічна.

Слід зазначити, що у перлітових і мартенситних сталей спостерігається різке зниження інтенсивності навантаження ріжучого леза завдяки аустенізації металу припуску. Великий вплив робить плазмовий нагрів і на зменшення тиску на задній поверхні зуба при розвинених фасках зносу, що виражається в істотному падінні величини складової сили різання  $P_y$ . Так, при обробці сталей, схильних до наклепу (45Г17Ю3 і 110М13Л), вже при фасці зносу 0,3 мм при фрезеруванні «в холодну» сила  $P_y$  досягає надзвичайно великого значення, приводячи до руйнування ріжучої кромки. При ПМФ припуску, що має температуру в момент обробки  $\theta = 250$  °С, сила  $P_y$  зменшується до п'яти разів, що дозволяє нормально експлуатувати інструмент навіть при фасках зносу понад 2 мм.

Таким чином, метал припуску, що надходить в зону різання, в залежності від глибини шару може мати різні фізико-механічні властивості (рис.2). На поверхні можуть бути присутні шари металу: оплавленого 2, що зазнав структурно-фазові перетворення (типу гартівних), 3 і структурно-релаксаційні (типу відпускових) 4, а також практично незмінного 1.



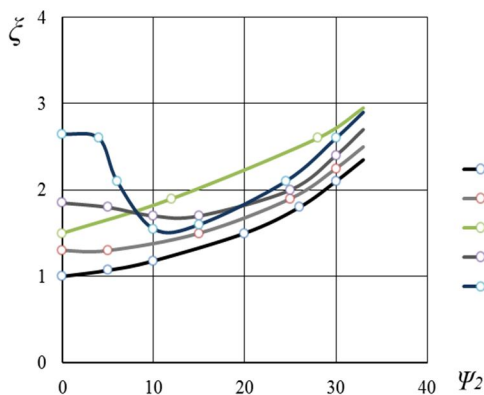
**Рис.2.** Схеми нагріву і зрізання припуску при циліндричному (а) і торцевому (б) ПМФ:  $B$  – ширина фрезерування;  $l$  і  $b$  – розміри опірної плями нагрівання;  $q$  – інтенсивність теплового джерела

Так як зуб фрези в процесі різання при ПМФ перетинає шари металу, що знаходяться в різних структурних і напружених станах, одним із завдань досліджень було вивчення названих чинників на силове навантаження ріжучого клина. Короткочасність контакту зуба фрези із заготовкою ( $10^{-3} \div$

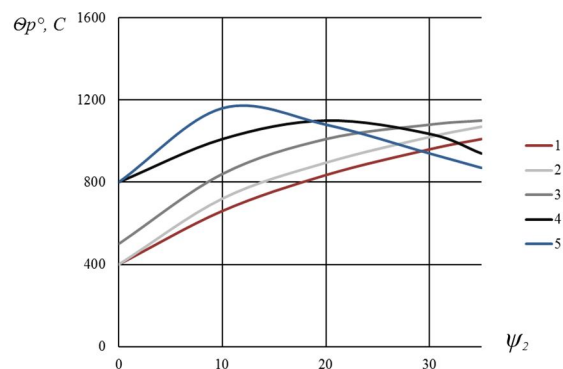
$10^{-2}$  с) визначила необхідність використання п'єзоелектричних датчиків, встановлених в корпусі спеціальної динамометричної фрези.

Вивчення усадки стружки в умовах змінної товщини зрізу по довжині контакту зуба фрези із заготовкою проводилося по повздовжньому перетину стружки яка утворюється. Було встановлено, що довжина контакту залежить від структурного стану зрізаного шару, досягаючи свого максимального значення при зрізанні аустеніту (рис.3).

Проведене, методом природної термопари, експериментальне вивчення температури різання показало, що вона істотно змінна по шляху контакту зуба фрези із заготовкою. При цьому середній за час контакту рівень температури різання при ПМФ перлітно-мартенситних сталей мінімальний при охолодженні припуску аж до точки початку мартенситного перетворення (рис.4).



**Рис.3.** Зміна усадки стружки шляхом контакту зуба фрези із заготовкою при попутному ПМФ сталі 38ХНЗМФА



**Рис.4.** Зміна температури різання по шляху контакту зуба фрези із заготовкою при попутному ПМФ сталі 38ХНЗМФА:  $V = 160$  м/хв;  $t = 8$  мм;  $S_z = 0,2$  мм/зуб; 1,2,3,4 - при плазмовому нагріванні: 1 -  $\theta = 450$  °С; 2 -  $\theta = 300$  °С; 3 -  $\theta = 200$  °С; 4 -  $\theta = 20$  °С; 5 - при обробці без нагріву)

Досить значний вплив на характер навантаження зуба надає вибір схеми фрезерування.

При циліндричному попутному фрезеруванні врізання зуба відбувається в поверхневій, найбільш знеміченій шарі припуску, що знижує інтенсивність динамічного навантаження лез фрези. Вихід зуба з контакту з заготовкою здійснюється при нульовому перетині зрізу і не супроводжується приварюванням стружки до передньої поверхні, завдяки чому відсутнє викришування різальної кромки при подальшому відділенні зуба.

У разі зустрічного фрезерування зуб врізається в практично незнемічений шар  $l$  з нульової товщини зрізу, що призводить до проковзування зуба фрези, сильному наклепу зони врізання і викришуванню різальної кромки. При цьому виходу зуба з контакту з заготовкою супроводжує приварювання до нього стружки своїм товстим кінцем, сформованої з металу найбільш пластичних зон 2 і 3 (рис.2). При подальшому врізанні зуба стружка відділяється з великими (до 1 мм) блоками твердого сплаву, вирваними з боку передньої поверхні леза. Це робить зустрічне циліндричне ПМФ практично неможливим.

При торцевому ПМФ різні ділянки ріжучої кромки в процесі різання знаходяться в різних умовах. Так, вершина зуба на всьому шляху по дузі контакту може переміщатися в шарі, що не зазнали будь-яких структурних перетворень. У той же час, віддалена від вершини ділянка різальної кромки буде рухатися в застиглому після розплавлення шарі.

При торцевому ПМФ, також, як і при циліндричному, рекомендується попутне фрезерування, оскільки така схема практично запобігає викришування різальних кромки фрези через приварювання стружки до передньої поверхні. При торцевому фрезеруванні можна виключити приварювання стружки в результаті меншого нагріву зони виходу зуба фрези з контакту з заготовкою, що легко здійснити відповідним розташуванням джерела нагріву [4].

Зниження інтенсивності навантаження зубів фрези в умовах ПМФ дозволяє ефективно застосовувати безвольфрамкові тверді сплави типу КНТ16 і ТН20, зазвичай непридатні при чорновому фрезеруванні враховуючи їх підвищену крихкість. Зносостійкість таких сплавів в умовах ПМФ часто не гірше, ніж у сплаву Т15К6.

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** В умовах фрезерування плоских поверхонь як джерело нагрівання доцільно використовувати плазмову дугу, яка сканує по двох координатах в площині подачі, що дозволяє проводити нагрів без оплавлення поверхні заготовки і забезпечує значно кращі умови регулювання величини тепловкладення.

Плазмовий нагрів при торцевому фрезеруванні забезпечує протікання специфічного термічного циклу в матеріалі припуску, в результаті чого знижується твердість оброблюваного матеріалу, відбуваються структурно-фазові перетворення, збільшується пластичність; раціональна температура нагріву припуску для середньолегованих сталей і титанових сплавів становить 250 ... 400 °С.

Зміна механічних властивостей припуску важкооброблюваних матеріалів, що відбулося внаслідок плазмового впливу, призводить до зниження питомих навантажень на ріжучий клин, до зменшення інтенсивності крихкого руйнування ріжучого леза і його округлення внаслідок ослаблення адгезійної взаємодії інструментального і оброблюваного матеріалів.

Найбільш раціональним є попутне ПМФ з нагріванням припуску по всій ширині фрезерування, що створює сприятливі умови роботи ріжучого леза на всьому протязі довжини контакту зуба фрези із заготовкою. Нагрівання скануючою плазмовою дугою ділянки входу ріжучого клина в заготовку не дозволяє знизити інтенсивності округлення ріжучого леза, що призводить до погіршення умов силового навантаження ріжучого клина і зниження його стійкості.

#### *Список літератури*

1. Коротких М.Т., Шатерин М.А., Лаевский Г.Б. Плазменно-механическое фрезерование труднообрабатываемых материалов. – Л.: ЛДНТП, 1988. – 24 с.
2. Шатерин М.А., Коротких М.Т., Нечаев В.П. Плазмотрон для плазменно-механической обработки. – «Сварочное производство», 1986, №8, - с.27, 28.
3. Нечаев В.П., Рязанцев А.А. Особенности тепловых процессов при обработке заготовок с плазменным нагревом. – Вісник Криворізького технічного університету. Збірник наукових праць. – Вип.26. Кривий Ріг, 2010. – с.157-160.
4. Шатерин М.А., Коротких М.Т., Нечаев В.П. Плазменно-механическое торцевое фрезерование. – Машиностроитель, 1986, №9.
5. Шатерин М.А., Коротких М.Т. Плазменно-механическое фрезерование фасок на кромках листов из стали 30Х2Н2М. – в сб.: Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. – М.: МДНТП, 1981.

6. **Коротких М. Т., Ушомирская Л. А.** Особенности применения плазменного нагрева при обработке труднообрабатываемых материалов резанием. – *Металлообработка*. – СПб. №2 (68) 2012. – с. 23-27.
7. **Мрочек Ж. А., Кожуро Л. М., Хейфец М. Л.** Плазменно-механическая обработка материалов. – *Вестник ГГТУ имени П.О. Сухого*. – Гомель, №4 (26) 2006. – с. 44-47.
8. **Лолодзе Т.Н.** Прочность и износостойкость режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.
9. **Подураев В.Н.** Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания. М.: Машиностроение, 1977. – 304 с.
10. **Нечаев В.П., Позняков И.Н.** Структурные превращения в срезаемом слое при плазменно-механической обработке. – *«Плазмотехнология»*: Сб. науч. тр. – Киев. – 1991. – С. 35-37
11. **Кунин В.С.** Опыт внедрения плазменно-механической обработки. – Л.: ЛДНТП, 1982. – 28с.
12. **Резников А.Н., Резников Л.А.** Энергетические расчеты при резании с плазменным подогревом обрабатываемого материала. – *Энергомашиностроение*, 1981, №11, с. 26-28
13. The PERA «Cutfast» plasma-assisted Hot-machining process. – *Engineering Digest (Canada)*, 1977, 38, №7, p. 17.
14. **Вакаса Х.** Применение обработки резанием с плазменным подогревом. – *Oyo kikai kogau (Mechanical Engineering Application)*, 1976, т. 17, №3, с. 54-59.
15. **Шатуров, Г. Ф.** Прогрессивные процессы механической обработки поверхностей / Г. Ф. Шатуров, Ж. А. Мрочек. – Минск : УП «Технопринт», 2001. – С. 460.

Рукопис подано до редакції 13.04.2018

УДК 331.452

Т. М. ТАЙРОВА, канд. хім. наук, ст. наук. співроб.

ДУ «Національний науково-дослідний інститут промислової безпеки та охорони праці», Київ

## ОЦІНЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТІ СУОП У ХІМІЧНОМУ КОМПЛЕКСІ

**Мета.** Оцінювання результативності функціонування системи управління охороною праці та її підсистем, формування науково обґрунтованих заходів запобігання виробничому травматизму.

**Методи дослідження.** Для досягнення поставленої мети використано системний підхід, метод комплексного аналізу щорічної статистичної звітності про нещасні випадки за організаційними, технічними та санітарно-гігієнічними причинами їх настання, аналітичний метод визначення ризику аварій на підприємствах хімічного комплексу з використанням програми «IRRAS» та встановлення залежностей функціонування системи охорони праці від показників, що характеризують чинники зовнішнього і внутрішнього середовища на підприємствах хімічного комплексу. Розроблено методику визначення ризику настання нещасних випадків на виробництві з позицій дотримання як працівником, так і роботодавцем нормативних актів з охорони праці. Вивчення поведінки системи управління охороною праці в хімічному комплексі проведено з використанням системного підходу на основі математичної моделі.

**Наукова новизна.** Уперше побудовано математичну модель системи охорони праці, яка на відміну від існуючих, дозволяє комплексно оцінити результативність функціонування системи охорони праці з урахуванням результативності функціонування усіх її підсистем, та визначити той чинник, який найбільшим чином впливає на її результативність.

**Практична значимість.** Отримані результати дозволяють розробляти для хімічної галузі науково-обґрунтовані управлінські рішення та найбільш ефективні заходи, які ґрунтуються на комплексному оцінюванні результативності функціонування СУОП та її підсистеми – системи охорони праці, а їх використання дозволяє запобігати небезпечним ситуаціям, аваріям та виробничому травматизму у хімічному комплексі.

**Результати.** Визначено, що проблемні питання охорони праці на підприємствах хімічного комплексу в Україні, пов'язані перш за все з високим рівнем ймовірності настання небезпечних ситуацій та аварій, які можуть призводити до травмування працівників, а також супроводжуватись хімічним зараженням прилеглих до комплексу територій. Для вирішення зазначених питань проведено комплексний аналіз результативності функціонування кожної підсистеми системи охорони праці, визначено узагальненні або найбільш впливові показники для їх оцінювання, кількісно оцінено ризик настання небезпечних ситуацій та нещасних випадків на виробництві на основі програми «IRRAS» та розробленої методики, в основу якої покладено складне групування статистичних даних щодо порушень вимог НПАОП для основних учасників трудового процесу - працівника і роботодавця. Розроблено математичну модель системи охорони праці для хімічного комплексу, яка включає показники, що оцінюють кожну її підсистему, а саме економічну, технічну, організаційну, санітарно-гігієнічну і правову, що дозволяє комплексно досліджувати поведінку системи охорони праці і розробляти заходи, спрямовані як на стабілізацію системи охорони праці та СУОП, так і підвищення результативності їх функціонування.

**Ключові слова:** СУОП, виробничий травматизм, система охорони праці, внутрішні та зовнішні чинники, математичне моделювання, хімічний комплекс.

doi: