

## ІНЖЕНЕРІЯ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН КОМБІНОВАНОЮ ОБРОБКОЮ НА ОСНОВІ ТОЧІННЯ З ЕЛЕКТРОІМПУЛЬСНИМ НАГРІВАННЯМ

Тулупов В. І., Онищук С. Г., Міранцов С. Л.

Розглянуто метод комбінованої обробки поверхонь деталей машин електроімпульсним нагріванням, заснований на механічному впливі ріжучого інструменту на заготовку, який супроводжується локальним нагрівом поверхневого шару електричним струмом. Встановлена загальна закономірність впливу точіння з електроімпульсним нагріванням на мікротвердість зразків зі сталі 40ХН. Одержане емпіричне ступеневе рівняння, яке дозволяє розрахувати значення швидкості зношування в дослідженій області змінних факторів і поблизу цієї області побудувати поверхню відгуку та вибрати режими точіння з електроімпульсним нагріванням, що забезпечують максимальне підвищення зносостійкості матеріалу пари тертя у межах дослідженої області значень технологічних факторів. Визначені режими обробки точінням з електроімпульсним нагріванням, при яких швидкість зношування мінімальна.

Рассмотрен метод комбинированной обработки поверхностей деталей машин электроимпульсным нагревом, основанный на механическом воздействии режущего инструмента на заготовку, который сопровождается локальным нагревом поверхностного слоя электрическим током. Установлена общая закономерность влияния точения с электроимпульсным нагревом на микротвердость образцов из стали 40ХН. Получено эмпирическое степенное уравнение, которое позволяет рассчитать значение скорости изнашивания в исследованной области переменных факторов и вблизи этой области построить поверхность отклика и выбрать режимы точения с электроимпульсным нагревом, обеспечивающие максимальное повышение износостойкости материала пары трения в пределах исследованной области значений технологических факторов. Определены режимы обработки точением с электроимпульсным нагревом, при которых скорость износа минимальная.

A method for the combined treatment of surfaces of machine parts heating electric pulse based on the mechanical action of the cutting tool to the workpiece, which is accompanied by local heating of the surface layer of electric shock. A general pattern of the impact of turning on the heat with electric pulse microhardness of steel. Empirical power equation that allows us to calculate the value of the rate of wear in the investigated range of variables and near the area to build the response surface and turning the mode selected with the electric pulse heating to ensure maximum durability of the material increase in the friction pair within the investigated range of values of technological factors. Modes of treatment turning to electric pulse heating, under which the minimum rate of wear.

Тулупов В. І.

канд. техн. наук,  
ст. викл. каф. ТМ ДДМА  
tiup@dgma.donetsk.ua

Онищук С. Г.

канд. техн. наук,  
доц. каф. ТМ ДДМА

Міранцов С. Л.

канд. техн. наук,  
доц. каф. ТМ ДДМА

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ.

УДК 621. 787; 621.941.01

Тулупов В. І., Онищук С. Г., Міранцов С. Л.

## ІНЖЕНЕРІЯ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН КОМБІНОВАНОЮ ОБРОБКОЮ НА ОСНОВІ ТОЧІННЯ З ЕЛЕКТРОІМПУЛЬСНИМ НАГРІВАННЯМ

Одними з основних показників якості машин є надійність і ресурс, які визначаються властивостями поверхневих шарів деталей і з'єднань: межею витривалості, корозійностійкістю, зносостійкістю, коефіцієнтом тертя, контактною жорсткістю, міцністю і герметичністю з'єднання. Зниження технічних характеристик машин в процесі експлуатації нижче допустимого рівня, як правило, тягне за собою значні матеріальні витрати, пов'язані з відновленням зношених механізмів або їх заміною. Досягнення високої якості та експлуатаційної надійності машин, а також їх більш низької вартості, що є умовою забезпечення високого і стійкого рівня ринкової конкурентоспроможності, можливо лише на основі застосування нових перспективних розробок і наукоємних технологій [1].

Відповідно до стандарту ISO 9004-1, життєвий цикл виробу – це сукупність процесів, що виконуються від моменту виявлення потреби суспільства у визначеній продукції до моменту задоволення цих потреб та утилізації продукції. До таких процесів належать: перед-проектні дослідження, розробка технічного завдання, проектування та конструювання, технологічна підготовка виробництва, виробництво та випробування дослідних зразків, виробництво виробів, поставка споживачам, експлуатація, виведення з експлуатації [2]. Відповідно до вчення про інженерію поверхні необхідно якість поверхні деталей розглядати на всіх етапах життєвого циклу виробу [3]. На етапі виготовлення формуються різними технологічними методами ті показники інженерії поверхні, що були закладені на етапі проектування та технологічної підготовки виробництва.

Великі потенційні можливості у покращенні експлуатаційних властивостей поверхонь деталей машин мають методи, засновані на застосуванні концентрованих потоків енергії, що пов'язано з локальністю дії на оброблювану поверхню. До них належить точіння з електроімпульсним нагріванням (ЕІН), засноване на механічній дії інструменту на заготовку, що супроводжується локальним нагріванням металу імпульсним струмом. У результаті термомеханічних процесів відбувається зміцнення поверхневого шару оброблюваної поверхні заготовки. Технологічні можливості застосування методу точіння з ЕІН в обробленні робочих поверхонь деталей машин, які працюють в умовах тертя і контактних навантажень, практично не вивчені.

Метою роботи є дослідження застосування методу точіння з електроімпульсним нагріванням для формування зміцнених поверхневих шарів деталей.

У процесі точіння з електроімпульсним нагрівання послідовно зі зняттям припуску при проходженні імпульсу струму через контактну площину «різець – деталь» відбувається інтенсивне розігрівання ювенільної поверхні калібрувальною фаскою різальної пластини, що спричиняє зниження межі текучості та збільшення пластичності матеріалу. Умови, при яких протікає тепловий процес (швидкість нагрівання й охолодження), сприяють фазово-структурним утворенням, що відбуваються у локальних регулярно розміщених по оброблюваній поверхні фрагментах, і таким чином формується регулярна дискретна структура [4].

Дослідження точіння з електроімпульсним нагріванням виконувалось на зразках зі сталі 40ХН. Експериментальними дослідженнями було встановлено вплив технологічних факторів, а саме: механічних – швидкості різання, подачі та глибини різання; електричних – частоти, шпаруватості та сили імпульсного струму на шорсткість поверхні після оброблення точінням з ЕІН. Для параметра шорсткості Ra (мкм) за результатами статистичного оброблення дробового факторного експерименту з планом  $2^{6-3}$  [5] одержано рівняння регресії у натуральному виразі:

$$Ra = \frac{11,92}{I^{0.223} \cdot v^{0.155} \cdot q^{0.136} \cdot f^{0.035} \cdot S^{0.026}} \quad (1)$$

де  $I$  – сила імпульсного струму, А;

$v$  – швидкість різання, м/хв.;

$q$  – шпаруватість струму, %;

$f$  – частота, Гц;

$S$  – подача, мм/об.

Аналіз рівняння регресії (1) показав, що максимально впливають на величину мікронерівностей поверхні зразків, які формуються у процесі точіння з ЕІН, швидкість різання  $v$ , сила імпульсного струму  $I$ , шпаруватість струму  $q$  і його частота  $f$ , а глибина різання в зоні експерименту ( $t = 0,2 \dots 0,5$  мм) не впливає на шорсткість обробленої поверхні зразків. У разі збільшення сили імпульсного струму  $I$  та швидкості різання  $v$  відбувається зниження висоти мікронерівностей. У результаті нейромережного моделювання отримані значимості входів, які показують, що у процесі зміцнення деталей зі сталі 40ХН найбільше впливає на шорсткість сила струму зі значимістю 1, швидкість різання 0,60 і шпаруватість імпульсного струму 0,45. Мінімальна величина шорсткості формується під час оброблення поверхні з силою струму  $I = 250$  А, шпаруватості  $q = 0,65$  %, при швидкості різання  $v = 100$  м/хв.

Вплив режимів оброблення точінням з ЕІН на механічні властивості поверхневого шару зразка оцінювали за зміною його мікротвердості. Вимір мікротвердості за глибиною шару проводили за допомогою приладу ПМТ-3 на шліфах. Мікротвердість зміцненого шару змінювалася в межах 3,4...5,9 ГПа, залежно від режимів оброблення, при початковій мікротвердості поверхні деталі 2...2,12 ГПа. Шар, розташований на глибині від 0,03 до 0,07 мм мав найбільшу твердість, досягаючи 5,7...5,9 ГПа залежно від режимів оброблення.

Для параметра глибини зміцнення  $h_{zm}$  (мм) за результатами статистичного оброблення дробового факторного експерименту з планом  $2^{6-3}$  одержано рівняння регресії у натуральному виразі:

$$h_{zm} = 0,01 \cdot \frac{I^{0,889}}{v^{0,517} \cdot f^{0,013}} \quad (2)$$

Металографічні дослідження зразків, які оброблені точінням з ЕІН показали, що структура внутрішніх шарів складається з фериту та перліту. Унаслідок високошвидкісного нагріву й охолодження в тонкому поверхневому шарі при точінні з ЕІН формується дрібнозерниста мартенситна структура, а також «білий шар», що не тріється (звичайними способами), завглибшки до 0,1 мм (рис. 1). Основний метал і «білий шар» мають чіткий кордон, що говорить про істотну відмінність природи цих структур. Як показали дослідження в роботі [6], світла зона поверхневого шару є мартенситом і має значно вищу мікротвердість ( $H_c = 5,9$  ГПа).

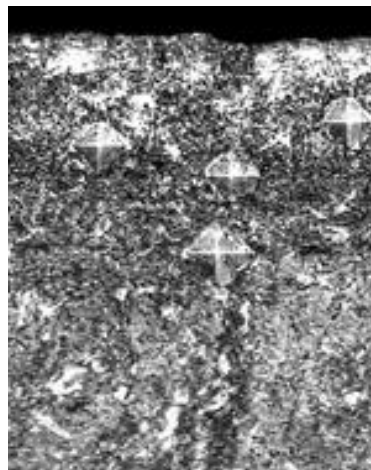


Рис. 1. Мікроструктура зразка зі сталі 40ХН (x125), обробленого точінням з ЕІН

Умови, в яких відбувається процес аустенізації при точінні з ЕІН, різко відрізняються від умов при гартуванні СВЧ або іншим звичайним методом, тому для процесу точіння з ЕІН, як і для електромеханічної [6], трибоелектричної обробки [7] і фрикційно-електричного модифікування [8], характерні такі особливості:

1) фазові перетворення протікають практично одночасно у всьому високотемпературному мікрооб'ємі поверхневого шару, який нагрівається імпульсом струму, що є особливістю електронагріву металу;

2) умови, при яких протікають фазові перетворення у процесі точіння з ЕІН, а це велика швидкість нагріву, зміщуються у бік вищих температур, що пояснюється кінетикою дифузійних процесів. Оптимальна температура гартування при збільшенні швидкості нагріву підвищується. Зростання зерна у поверхневому шарі металу, не дивлячись на високу температуру нагріву, не спостерігається, оскільки тривалість нагрівання і витримка дуже малі.

За «білим шаром», який утворюється у результаті обробки точінням з ЕІН, спостерігається дуже дрібнодисперсна структура, що отримана у результаті пластичної деформації металу в стані нагрівання калібрувальною кромкою різця, коли температура недостатньо висока для фазового перетворення.

Експериментальні дослідження параметрів зносостійкості поверхневого шару від режимів процесу точіння з ЕІН проводили на машині тертя СМЦ-2. Зносостійкість зразків, оброблених на різних режимах точіння з ЕІН, порівнювали із зносостійкістю зразків, оброблених термічним методом (типовий технологічний процес гартування СВЧ). За результатами всіх вимірювань для кожного зразка визначалося середнє значення маси й обчислювалася середня масова швидкість їх зношування.

Аналіз результатів дробового факторного експерименту показав, що величина технологічних факторів сили струму  $I$ , швидкості різання  $v$ , подачі  $S$ , шпаруватості  $q$  і частоти струму  $f$  певним чином впливає на швидкість зношування. Швидкість зношування визначається через рівняння регресії:

$$J_G = 0,271 \frac{f^{0.139}}{I^{0.309} \cdot v^{0.0737} \cdot q^{0.206} \cdot S^{0.198}} \quad (3)$$

Аналіз отриманих результатів випробування зразків на зношування показує, що етап прироблення завершується протягом 90 хв. Після завершення етапу прироблення швидкість зношування зменшується. Результати дослідження швидкості зношення підтверджують, що найбільше впливають на швидкість зношування: сила імпульсного струму  $I$ ; швидкість різання  $v$ ; шпаруватість  $q$ ; подача  $S$  – негативно, а частота струму  $f$  – позитивно.

Оптимізацію для визначення найбільш ефективного режиму оброблення точінням з ЕІН виконано, виходячи з умови  $J_G(I, v, q, f, S) \rightarrow \min$ :  $100 \leq I \leq 300$ ;  $50 \leq v \leq 100$ ;  $25 \leq q \leq 65$ ;  $100 \leq f \leq 500$ ;  $0,07 \leq S \leq 0,39$ . У результаті оптимізаційного дослідження визначена точка, в якій функція швидкості зношування  $J_G$  приймає мінімальне значення (рис. 2). Координата точки дорівнює:  $I = 300$  А;  $v = 100$  м/хв;  $q = 65$  %;  $f = 100$  Гц;  $S = 0,39$  мм/об.

Тривалість імпульсу струму, отримання зміцнених фрагментів, дорівнює [9]:

$$\tau_i = \frac{60 \cdot l_\phi}{\pi \cdot D_{\text{дем}} \cdot n} \cdot \kappa, \quad (4)$$

звідси довжина зміцнених фрагментів

$$l_\phi = \frac{\tau_i \cdot \pi \cdot D_{\text{дем}} \cdot n}{60 \cdot \kappa}, \quad (5)$$

Довжина  $l_\phi + l_{m\phi}$  дорівнює:

$$l_\phi + l_{m\phi} = \frac{\pi \cdot D_{\text{дем}} \cdot n}{60 \cdot f_i}. \quad (6)$$

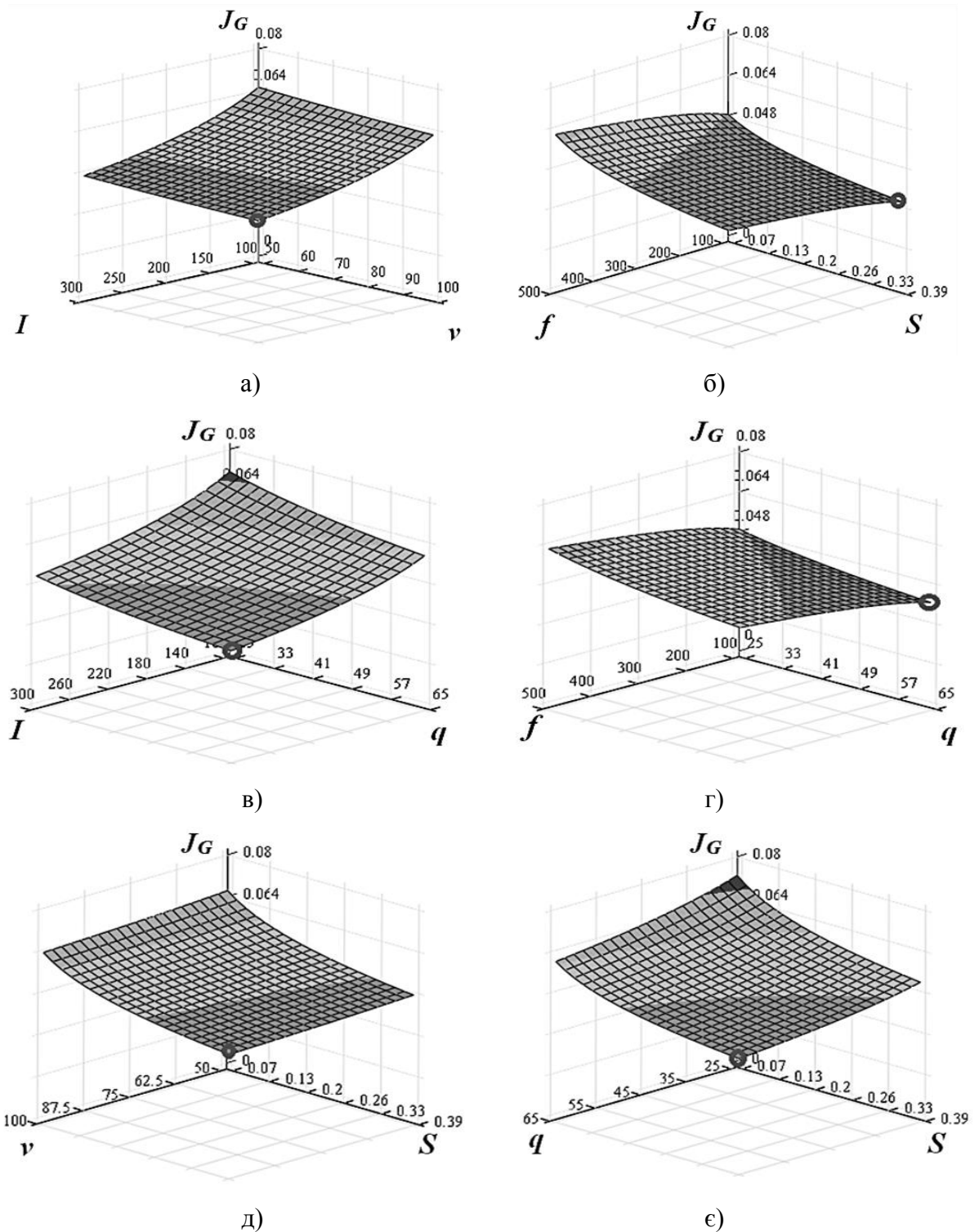


Рис. 2. Координата точки (виділена колом), при якій функція  $J_G$  приймає  $min$ :  
 а –  $J_G(I, v)$ ; б –  $J_G(f, S)$ ; в –  $J_G(I, q)$ ; г –  $J_G(f, q)$ ; д –  $J_G(v, S)$ ; е –  $J_G(q, S)$

Эффективная частота обработки для необходимого диаметра обработки [9]:

$$f_i = 0,001 \cdot \pi \cdot D_{det} \cdot n,$$

де

$$n = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot D_{дет}}$$

Після підстановки та скорочення, отримуємо

$$f_i = 0,001 \cdot 1000 \cdot v = 1 \cdot v \text{ Гц.}$$

### ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що у процесі точіння з ЕІН відбувається зниження висоти мікронерівностей. Мінімальна величина шорсткості формується у разі обробки поверхні з силою струму  $I = 250 \text{ А}$ , шпаруватості  $q = 65 \%$  при швидкості різання  $v = 100 \text{ м/хв}$ .

2. Встановлена загальна закономірність впливу точіння з ЕІН на мікротвердість зразків зі сталі 40ХН. Змінення ступеню зміцнення за глибиною поверхневого шару з максимумом мікротвердості у поверхні залежить, головним чином, від величини сили струму та швидкості різання. Зміцнення при термоелектрично-деформаційній дії на поверхневий шар деталі у процесі точіння з ЕІН пов'язане з формуванням дрібнодисперсної структури поверхневого шару. Максимальна зміна відповідає режиму обробки  $I = 300 \text{ А}$ ,  $v = 50 \text{ м/хв}$ .

3. Одержане емпіричне ступеневе рівняння, яке дозволяє розрахувати значення швидкості зношування в дослідженій області змінних факторів і поблизу цієї області побудувати поверхню відгуку та вибрати режими точіння з ЕІН, що забезпечують максимальне підвищення зносостійкості матеріалу пари тертя у межах дослідженої області значень технологічних факторів. Всі параметри режиму точіння з ЕІН (сила струму, швидкість різання, шпаруватість імпульсного струму, частота струму та подача), крім глибини різання, впливають на триботехнічні властивості сталі 40ХН; найбільший вплив на підвищення зносостійкості здійснюють сили струму та швидкість різання.

4. Визначені режими обробки точінням з ЕІН для сталі 40ХН, під час яких швидкість зношування мінімальна при частоті обертання до  $1000 \text{ хв}^{-1}$ : сила імпульсного струму  $300 \text{ А}$ , швидкість різання  $100 \text{ м/хв}$ , шпаруватість імпульсів струму  $65 \%$ , частота струму  $100 \text{ Гц}$  і подача  $0,39 \text{ мм/об}$ .

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Инженерия поверхности деталей машин / Н. А. Амельченко, Н. Е. Анистратенко, Л. С. Добрынина, С. В. Михайлов, О. Е. Балашов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени акад. М. Ф. Решетова. – 2007. – Т. 6. – №1. – С. 111–114.
2. Технология машиностроения : учебник / Л. В. Лебедев, В. У. Мнацаканян, А. А. Погодин [и др.] – М.: «Академия», 2006. – 528 с.
3. Инженерия поверхностей деталей / Под. ред. А. Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
4. Ковалевський С. В. Спеціальні методи оброблення робочих поверхонь деталей машин : монографія / С. В. Ковалевський, В. І. Тулупов. – Краматорськ : ДДМА, 2012. – 100 с.
5. Научные исследования в технологии машиностроения / В. А. Ванин, В. Г. Однолько, С. И. Пестрецов, В. Х. Фидаров, А. Н. Колодин. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 232 с.
6. Электромеханическая обработка: технические и физические основы, свойства, реализация / В. П. Багмутов, С. Н. Паршев, Н. Г. Дудкина, И. Н. Захаров. – Новосибирск : Наука, 2003. – 318 с.
7. Байбарацкая М. Ю. Упрочняющая фрикционно-электрическая обработка стальных поверхностей трения / М. Ю. Байбарацкая, А. А. Пальянов, Ю. К. Машков // Трение и износ. – 2004. – (4) № 25. – С. 434–439.
8. Эдигаров В.Р. Влияние режимов поверхностного фрикционно-электрического модифицирования на структуру, механические и эксплуатационные свойства стали осей балансиров: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01 / В. Р. Эдигаров. – Тюмень, 2006. – 20 с.
9. Формирование регулярной дискретной структуры при чистовом точении с импульсным током / С. В. Ковалевский, В. И. Тулупов, А. А. Попивненко [и др.]. // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – Вип. 21. – С. 233–237.