

УДК 539.347

## МОДЕЛЮВАННЯ ОСАДЖУВАННЯ З ДОДАТКОВИМ УЛЬТРАЗВУКОВИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Лавріненков А.Д., Рогожа О.О.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

**Анотація:** У даній роботі проводиться математичне моделювання методом скінченних елементів процесу осаджування заготовок з алюмінієвого сплаву з/без додатковим ультразвуковим (УЗ) навантаженням при різних умовах тертя. Метою роботи є визначення впливу ультразвукових коливань і умов тертя на геометрію осаджених зразків і їх напружено-деформованого стану. В результаті дослідження встановлено, що при осаджуванні з додатковим УЗ навантаженням на малих ступенях деформації відбувається рівномірне збільшення діаметра зразка по всій висоті. Подальше осаджування з УЗ навантаженням (ступінь деформації до 20%) відбувається розширення верхнього торця зразки без значної зміни діаметра в середній частині заготовки і в районі нижнього торця. Також, в залежності від умов процесу картина розподілу температури буде відрізнятися. При осаджуванні з УЗ навантаженням відбувається активне збільшення температури верхнього торця зразка, тоді як, при осаджуванні без УЗ навантаження збільшення температури відбувається в середній частині зразка (в залежності від ступеня пластичної деформації). Також при осаджуванні з УЗ навантаженням максимальне зусилля процесу на 10-12% менше, ніж при осаданні без УЗ навантаження.

**Ключові слова:** осаджування; ультразвукове навантаження; обробка металів тиском з ультразвуком; відкрите і закрите штампування

Основним завданням формозмінної операції осаджування є зменшення висоти зразка з

Таблиця	
Параметри процесу УЗ осаджування з/без УЗ навантаженням	
Матеріал заготовки	Д16
Тип операції	Пластична деформація з урахуванням теплових процесів
Температура заготовки $T$ , °С	20
Частота УЗ коливань $f$ , кГц	22
Амплітуда УЗ коливань $A$ , мкм	20
Швидкість переміщення інструменту $V_z$ , м/с	20
Закон тертя	Леванов
Коефіцієнт Леванова	1,25
Тертя при УЗ навантаженні, без змащення	фактор тертя – 0,5
Тертя при осаджуванні без УЗ навантаження, змащення – мінеральне масло	фактор тертя – 0,15
Тертя при осаджуванні без УЗ навантаження, без змащення	фактор тертя – 0,5
Тертя при осаджуванні без УЗ навантаження, без врахування тертя	фактор тертя – 0
Ступінь деформації зразка, %	20

одночасним збільшенням його поперечного перерізу. Осаджування застосовують для зменшення анізотропії механічних властивостей в осьовому і поперечному напрямках, для більш рівномірного розподілу і подрібнення карбідів в сталях [1-5]. З огляду на нерівномірність деформації, яка зумовлена силами тертя на контактних поверхнях зразка з інструментом зразок набуває бочкоподібну форму. Одним із способів збільшення рівномірності деформації в об'ємі зразка є накладення УЗ коливань [6]. У ряді джерел вказується, що накладення УЗ коливань на інструмент дозволяє знизити зусилля

процесу в 3-5 разів, а також домогтися більш рівномірного розподілу твердості [7]. Залежно від схеми підведення енергії УЗ коливань до матеріалу, змінюється характер перебігу, нерівномірність розподілу деформацій і мікротвердості за обсягом металу, опору деформації.

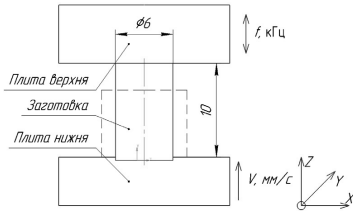


Рис. 1. Схема процесу осаджування з/без УЗ навантаження.

модельовання процесу осаджування алюмінієвого зразка Д16 в програмному комплексі QForm з метою визначення впливу УЗ коливань на характер розподілу напружено-деформованого стану в зразку, температури, а також на геометрію обробленого зразка.

Параметри процесу і схема процесу наведені в таблиці та рис. 1. відповідно.

При різних параметрах тертя контур осаджених зразків відрізняється. На рис 2, в і г, форма зразків має виражену симетричну бочкоободібність щодо торців зразка. При відсутності тертя (рис. 2, д) бочкоободібність зміщується в бік нижнього торця. При осаджуванні з УЗ коливаннями (рис. 2, б) відбувається розширення верхнього торця. Варто відзначити, що розширення верхнього торця зразка відбувається не з самого початку процесу. До ступеня деформації в 10% відбувається рівномірне збільшення діаметра зразка по всій висоті.

В ході експериментальних дослідженнях по УЗ осаджуванні алюмінієвих та мідних зразків [2, 6, 8, 9] також була отримана схожа форма торців зразків. Автори, на підставі свого досвіду і досвіду інших авторів, пояснюють подібний ефект локалізації пластичної деформації за рахунок високих швидкостей впливу інструменту на матеріал.

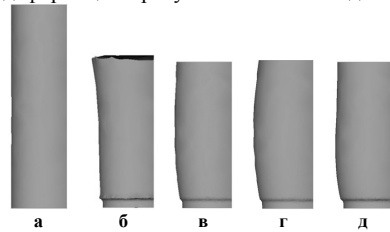


Рис. 2. Форма осаджених зразків (показані половини заготовки і зразків) а – заготовка, б – осаджування з УЗ коливаннями, в – осаджування без УЗ коливань (змащення – мінеральне масло), г – осаджування без УЗ коливань (без змащення), д – осаджування без УЗ коливань (без врахування тертя)

У місці розширення верхнього торця відбувається більш інтенсивне зростання температури матеріалу зразка. За рахунок багаторазового контакту торця зразка з поверхнею інструменту при осаджуванні з УЗ навантаженням відбувається поступовий розігрів матеріалу. Також робота пластичної деформації частково перетворюється в тепло. Все це разом і викликає більш інтенсивний розігрів верхнього торця, тоді як середня і нижня частина зразка практично не нагрівається на відміну від осаджування без УЗ навантаження, при якому верхній і нижній торці зразків мають меншу температуру.

Інтенсивність напружень при осаджуванні з УЗ навантаженням перевершує інтенсивність напружень при осаджуванні без УЗ навантаження. Це пояснюється великими швидкостями деформації, які викликані УЗ коливаннями інструмента, а також ефектом локалізації пластичної деформації.

При осаджуванні з УЗ навантаженням зусилля процесу на 10-12% менше за зусилля при осаджуванні без УЗ навантаження (рис.3). До моменту початку розширення верхнього торця зразка різниця між зусиллями була більше і становила 15-20%. На рис. 3 приведено порівняння

статичного зусилля при осаджуванні без УЗ навантаження (пунктирна лінія) з динамічним зусиллям при осаджуванні з УЗ навантаженням.



Рис. 3. Зусилля процесів осаджування з/без УЗ навантаження

*samples with/without additional ultrasonic loading under various friction conditions. The aim of the work is to determine the effect of ultrasonic vibrations and friction conditions on the geometry of the samples after upsetting and their stress-strain state. As a result of the study, it was established that with upsetting with additional ultrasonic loading at low degrees of deformation, a uniform increase of sample diameter along the entire height. Subsequent upsetting with ultrasonic loading (degree of deformation up to 20%), the upper end of the specimens is broadened without a significant change in the diameter in the middle part of the workpiece and in the region of the lower end. When upsetting with ultrasonic loading, an active increase in the temperature of the upper end of the sample occurs, whereas, with upsetting without ultrasonic loading, an increase in temperature occurs in the middle part of the sample (depending on the degree of plastic deformation). Also, with upsetting with ultrasonic loading, the maximum force of the process is 10–12% less than with a upsetting without ultrasonic loading.*

**Keywords:** upsetting; ultrasonic loading; metal forming with ultrasound; open and closed forging

### Моделирование осадки с дополнительным ультразвуковым нагружением

Лавриненков А.Д., Рогожа А.А.

*Аннотация.* В данной работе проводится математическое моделирование методом конечных элементов процесса осадки образцов из алюминиевого сплава с/без дополнительным ультразвуковым нагружением при различных условиях трения. Целью работы является определения влияния ультразвуковых колебаний и условий трения на геометрию осажённых образцов и их напряженно-деформированного состояния. В результате исследования установлено, что при осадке с дополнительным УЗ нагружением на малых степенях деформации происходит равномерное увеличения диаметра образца по всей высоте. Последующая осадка с УЗ нагружением (степень деформации до 20%) происходит уширение верхнего торца образца без значительного изменения диаметра в средней части заготовки и в районе нижнего торца. При осадке с УЗ нагружением происходит активное увеличение температуры верхнего торца образца, тогда как, при осадке без УЗ нагружения увеличение температуры происходит в средней части образца (в зависимости от степени пластической деформации). Также при осадке с УЗ нагружением максимальное усилие процесса на 10-12% меньше, чем при осадке без УЗ нагружения.

**Ключевые слова:** осадка; ультразвуковое нагружение; обработка металлов давлением с ультразвуком; открытая и закрытая штамповка

### Список літератури

1. Ковка и штамповка. Справочник. В 4-х т. / Ред. Совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1985 – Т.1. Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка/Под ред. Е.И. Семенова, 1985. 568 с., ил.
2. Yanxiong Liu, Sergey Suslov, Qingyou Han, Lin Hua, Clause Xu. Comparison between ultrasonic vibration-assisted upsetting and conventional upsetting. – Metallurgical and materials transactions A. – Vol. 44A. – July 2013. – pp.32-43.
3. Jung-Chung, YU-Chung Tsai. Investigation of the effect of ultrasonic vibration-assisted micro-upsetting on brass. – Material science and engineering A 580 (2013). – pp.125-132.
4. Zhendong Xie, Yanjin Guan, Jiqiang Zhai, Lihua Zhu, Chongkai Zhong. Study of ultrasonic vibration assisted upsetting of 6063 aluminum alloy. - Procedia Engineering 207 (2017). – 490-495.
5. J.-C. Hung, C.-C. Lin. Investigations on the material property changes of ultrasonic-vibration assisted aluminum alloy upsetting. - Materials and Design 45 (2013). - pp. 412-420.
6. J.-C. Hung et al. Frictional effect of ultrasonic-vibration on upsetting. - Ultrasonics 46 (2007). – pp. 277–284.
7. Кумабэ Д. Вибрационное резание: Пер. с яп. С.Л. Масленникова / Под ред. И.И. Портнова, В.В. Белова. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с., ил.
8. Северденко В.П., Клубович В.В., Степаненко А.В. Обработка металлов давлением с ультразвуком. Минск, «Наука и техника», 1973, стр. 288.
9. Haiyang Zhou, Hongzhi Cui, Qing H. Qin. Influence of ultrasonic vibration on the plasticity of metals during compression process. Journal of Materials Processing Tech. 251 (2018), pp. 164-159.