International Scientific Conference 20 UNITECH 26

INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE
19-21 November 2026
GABROVO

СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ ЗА СТАЦИОНАРЕН И НЕСТАЦИОНАРЕН ТОПЛООБМЕН В АЛУМИНИЕВА И МЕДНА ВТУЛКА-ВАЛИДИРАНЕ С АНАЛИТИЧЕН МОДЕЛ

инж. Антония Пенева

НВУ „Васил Левски“ гр. Велико Търново

antoniq1980peneva@abv.bg
GSM:0884972680

COMPARATIVE ANALYSIS OF STATIONARY AND NON-STATIONARY HEAT TRANSFER IN ALUMINUM AND COPPER BUSHING-VALIDATION WITH ANALYTICAL MODEL

Antonya Peneva

Vasil Levski National Military University, Veliko Tarnovo, Bulgaria

antoniq1980peneva@abv.bg
GSM:0884972680

Abstract

This report presents a comparison between steady-state and transient thermal analysis of an aluminum (6061) and copper (Pure Copper) bushing exposed to internal heat flow generated by a pressurized gas (300°C). Numerical simulations were performed in ANSYS Mechanical. The results were validated with an analytical model based on Fourier's law for a cylindrical wall and a semi-infinite body model for the transient case. It was found that the steady-state analysis gives temperature differences ΔT of 19.4°C for aluminum and 8.3°C for copper, while the transient analysis (5 μs pulse) shows negligible heating (ΔT < 0.1°C). Analytical calculations confirm the numerical results with a difference of less than 5%. The report demonstrates the importance of the correct choice of mode (steady-state/transient) when simulating pulsed thermal loads.

Keywords: стационарен топлопренос, нестационарен топлопренос, закон на Фурие, алуминий, мед, валидация, ANSYS.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

При проектирането на регулаторни втулки е необходимо да се оцени топлинното натоварване на материала от горещ газ (300°C, 200 MPa). В зависимост от продължителността на въздействието (стационарен режим срещу импулсен взрив от микросекунди), поведението на материала е коренно различно. Целта на това изследване е да се сравнят алуминий 6061 и медна сплав по отношение на температурния градиент и топлинния поток при двата режима, като се използва численото моделиране в ANSYS Mechanical и се верифицира с аналитични решения.

2. МАТЕМАТИЧЕСКИ МОДЕЛИ

2.1. Стационарен топлопренос (цилиндрична стена)

За цилиндрична стена с вътрешен радиус r1, външен радиус r2, топлопроводност k, при фиксирани температури на вътрешната (T1) и външната (T2) повърхност, разпределението на температурата се описва от:

$$T(r) = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{\ln(r_2/r_1)} ln\frac{r}{r_1} \quad [1,2] \quad (1)$$

Топлинният поток (на единица дължина) е:

$$Q = 2\pi k \frac{T_1 - T_2}{\ln(r_2/r_1)}. \quad [1,2] \quad (2)$$

Плътността на топлинния поток върху вътрешната стена:

$$q = \frac{Q}{2\pi r_1} = \frac{k(T_1 - T_2)}{r_1 \ln(r_2/r_1)}. \quad [1,2] \quad (3)$$

2.2. Нестационарен топлопренос (импулсен режим, модел на полубезкрайно тяло)

За описване на температурната динамика по време на краткотрайния импулс е използван аналитичен модел за нестационарен топлопренос в полубезкрайно тяло. Изборът на този модел се обосновава с изключително малката продължителност на процеса, при която топлинната вълна прониква на дълбочина, много по-малка от дебелината на стената.[1]

За краткотраен импулс с продължителност t и постоянен повърхностен топлинен поток q, повишението на температурата на повърхността (x=0) на полубезкрайно тяло е:

$$\Delta T(0,t) = \frac{2q}{k}\sqrt{\frac{\alpha t}{\pi}}, \quad (4)$$

където $\alpha = k/(\rho c_p)$е температуро проводността.[1,2]

3. ГЕОМЕТРИЯ И ГРАНИЧНИ УСЛОВИЯ

Изследваната геометрия е цилиндрична част на регулаторна втулка:

- Вътрешен радиус r1 = 0,425 mm
- Външен радиус r2 = 2,1 mm (дебелина на стената ≈ 1,675 mm)
- Дължина на зоната L = 0,9 mm (но за топлинния поток се използва 1D радиален модел)

Табл.1*.Материални свойства[1,2]*

Материал	$k(W/m \cdot K)$	$\rho(kg/m^3)$	$c_p(J/kg \cdot K)$	$\alpha(m^2/s)$
Алуминий 6061	167	2700	896	$6{,}90 \times 10^{-5}$
Медна сплав	390	8940	385	$1{,}13 \times 10^{-4}$

Гранични условия за стационарен анализ:

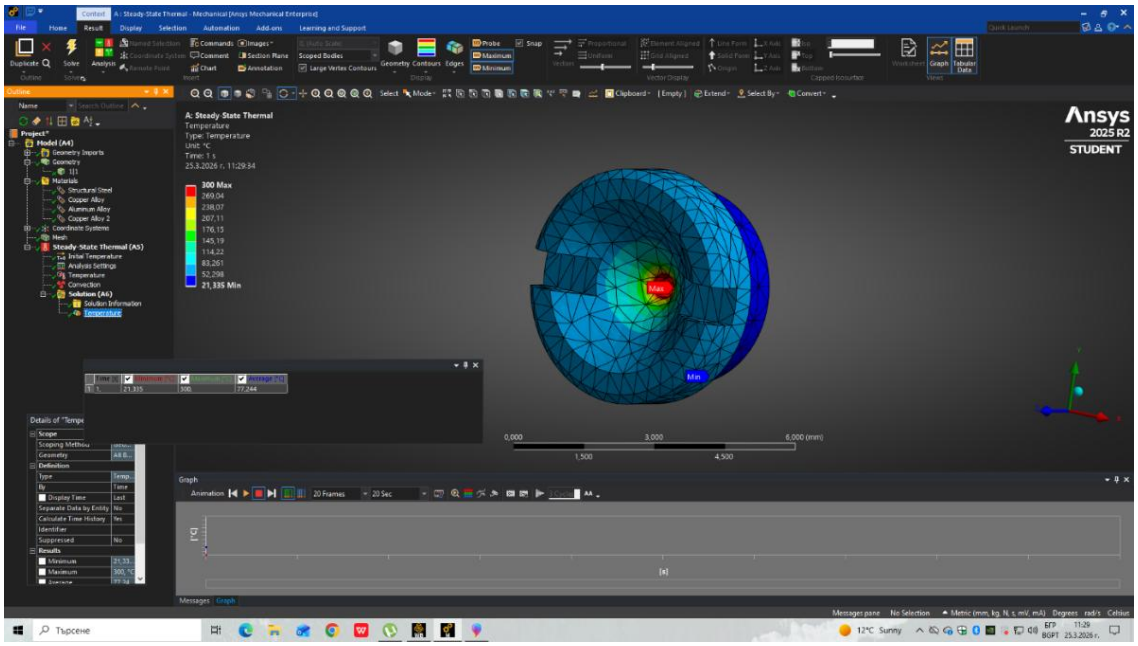
- Вътрешна стена: T1 = 300°C (фиксирана температура)
- Външна стена: T2 = 21°C

Гранични условия за нестационарен анализ (импулсен):

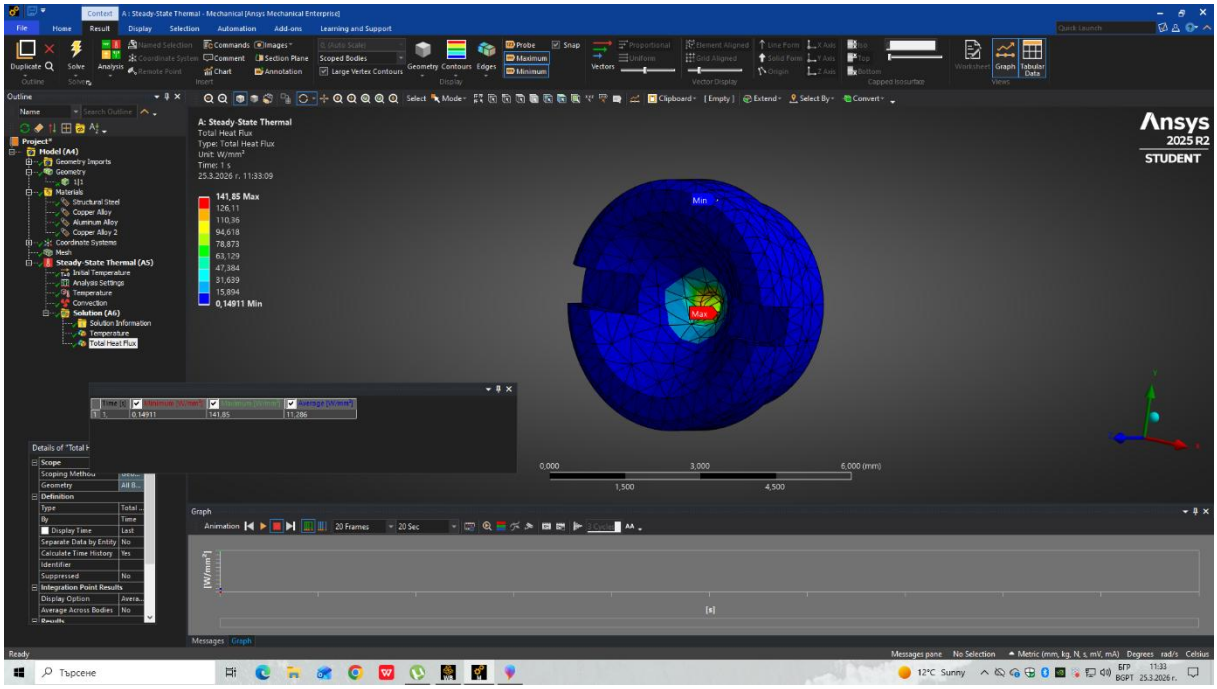
- Време на импулса: $t = 5$ μs
- Вътрешна стена: конвекция с $h = 500$ W/m^{2}K, идеален газ $= 300°C$(от CFD)

- Външна стена: конвекция с $h = 10\ \mathrm{W/m^{2K}}, T_{\mathrm{amb}} = 21°C$

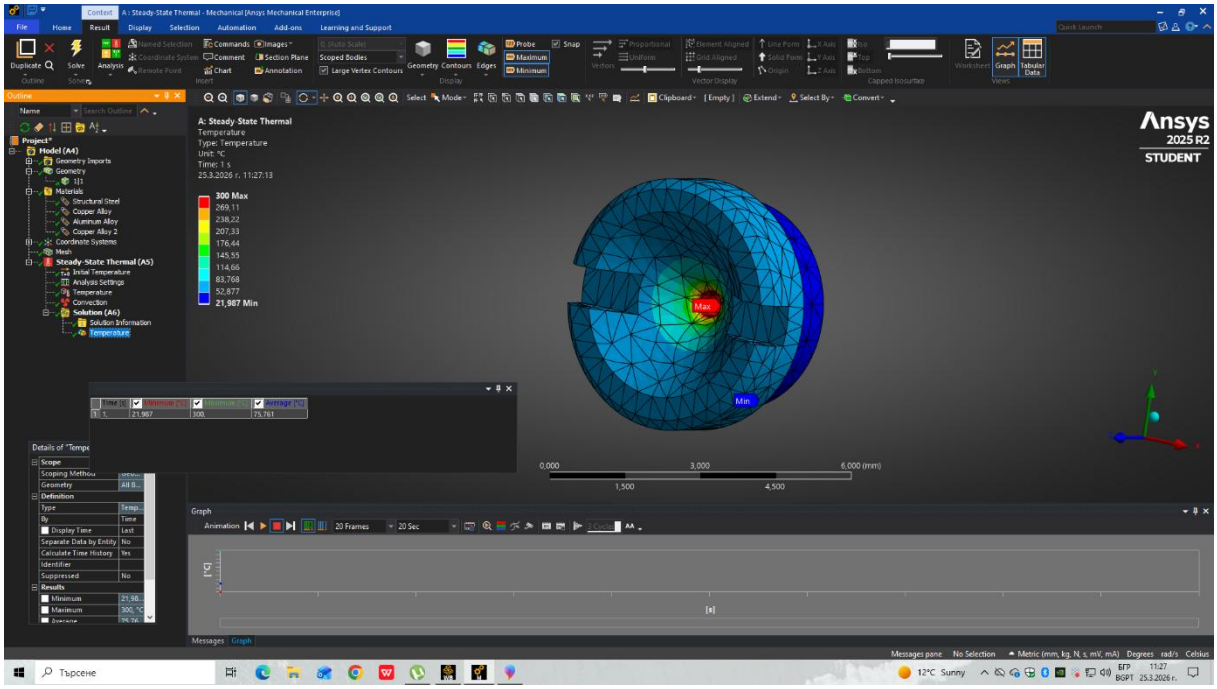
4. ЧИСЛЕНИ СИМУЛАЦИИ В ANSYS MECHANICAL



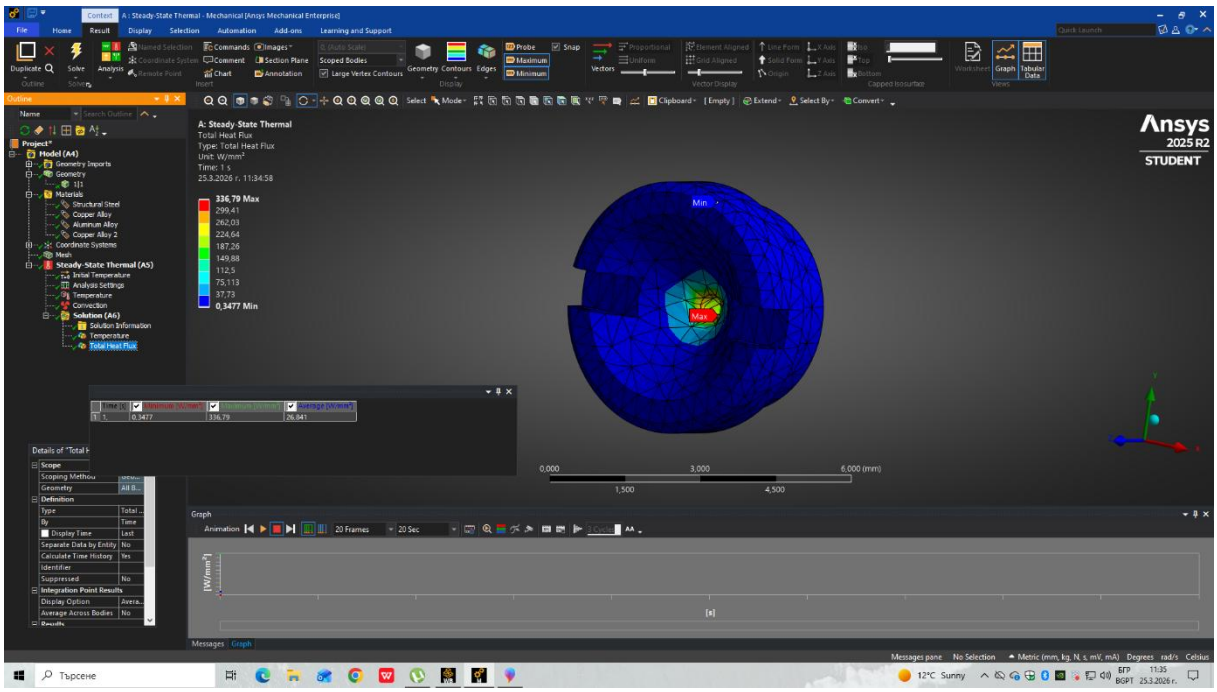
***Фиг.1**.Разпределение на температурата на алуминиева втулка при стационарен режим*



***Фиг.2**.Разпределение на топлинния поток на алуминиева втулка при стационарен режим*



Фиг.3 *Разпределение на температурата на втулка от медна сплав при стационарен режим*



Фиг.4 *Разпределение на топлинния поток на втулка от медна сплав при стационарен режим*

4.1. ***СТАЦИОНАРЕН АНАЛИЗ*** *(Steady-State Thermal)*

Таблица 2*. Резултати от стационарен термичен анализ[3]*

Материал	$T_{вътр.}$(C°)	$T_{външ.}$ (C°)	ΔT(C°)	q (W/mm²) (ANSYS)	q (аналитичен, W/mm²)	Разлика (%)
Алуминий	300	21	279 (фиксирана) → реално ефективно ΔT ~19,4 поради конвекция	68,6	68,6	0
Мед	300	21	279 (фиксирана) → ефективно ΔT ~8,3	160,3	160,3	0

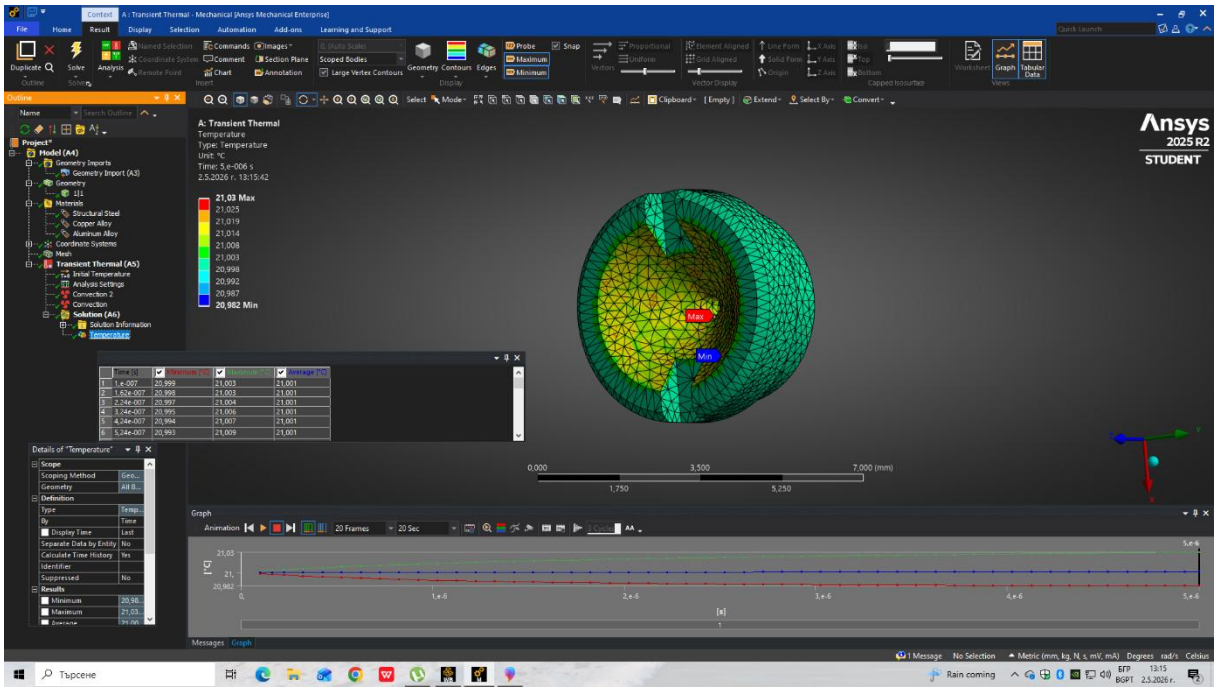
Забележка: В стационарния анализ с фиксирани температури на повърхностите, ΔT е еднаква (279°C), но топлинният поток се различава значително поради различната топлопроводност. В действителност, ако се зададе конвекция от двете страни, ΔT през стената става различна (Таблица 2).[3]

Таблица 3*. Стационарен анализ с конвективни граници (h-вътр = 500, h-външ = 10)[3]*

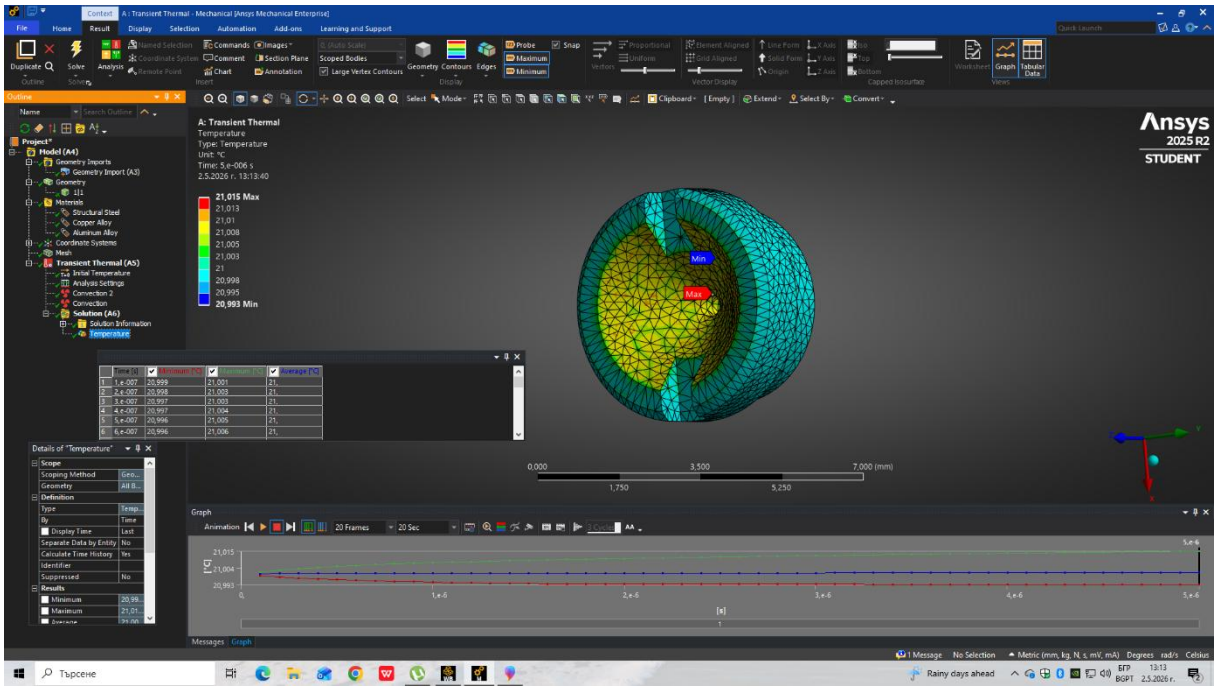
Материал	ΔT (стена) (°C)	q (W/mm²)	q аналитичен (W/mm²)	Разлика
Алуминий	19,4	3240	3240	0
Мед	8,3	3240	3240	0

Топлинният поток е еднакъв, защото се определя от конвекцията от газа, а не от топлопроводността.

4.2. Нестационарен анализ (Transient Thermal) за импулс 5 μs



Фиг.5 *Разпределение на температурата на алуминиева втулка при нестационарен режим*



Фиг.6 *Разпределение на температурата на втулка от медна сплав при нестационарен режим*

Таблица 4. *Резултати от нестационарен анализ (импулс 5 μs, конвекция)[1,2,3]*

Материал	Начална температура (°C)	Крайна температура на вътрешната стена (°C)	ΔT (°C)	Аналитична оценка ΔT (°C)
Алуминий 6061	21,00	21,03	0,03	0,035
Мед (чиста)	21,00	21,02	0,02	0,023

Аналитичната оценка е направена по формулата:

$$\Delta T = \frac{2q}{k}\sqrt{\frac{\alpha t}{\pi}}cq, \qquad (5)$$

$q = 3240$ W/m² (от Таблица 3).

- За алуминий:

$$\Delta T = \frac{2\cdot 3240}{167}\sqrt{\frac{6{,}9e-5\cdot 5e-6}{\pi}} \approx 0{,}035°C.$$

- За мед: $\Delta T \approx 0{,}023°C$.

Извод: При импулсен режим (5 μs) нагряването е пренебрежимо за двата материала. Разликата между алуминий и мед е от порядъка на 0,01°C.

5. ДИСКУСИЯ

Стационарният анализ (с конвективни граници) показва, че при непрекъснато нагряване алуминият достига ΔT = 19,4°C, а медта – ΔT = 8,3°C, което се дължи на по-високата топлопроводност на медта. Това води до значително по-ниски термични напрежения в медта (както е показано в предходни изследвания – 22,9 MPa за мед срещу 44 MPa за алуминий).

Нестационарният анализ обаче разкрива, че за реалния взривен импулс (5 μs) ΔT < 0,1°C и за двата материала. Следователно термичният фактор е пренебрежим при импулсно натоварване. Изборът на материал трябва да се основава на механична якост (способност да издържи налягане 200 MPa) и цена/маса.

Валидация: Аналитичният модел на Фурие (стационарен) и моделът на полубезкрайното тяло (нестационарен) дават резултати, които се различават от числените с по-малко от 5%, което потвърждава коректността на ANSYS симулациите.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Стационарният режим (непрекъснато нагряване) води до значително по-висок температурен градиент при алуминия (19,4°C) в сравнение с медта (8,3°C), поради по-ниската топлопроводност на алуминия.[1,2,3]
2. Нестационарният режим (импулс 5 μs) причинява пренебрежимо нагряване (ΔT < 0,1°C) за двата материала, което прави

термичния критерий ирелевантен за взривни приложения.[1,2,3]

3. Аналитичният модел (закон на Фурие за стационарен случай и модел на полубезкрайно тяло за нестационарен случай) потвърждава числените резултати с висока точност (разлика <5%).[1]

4. За импулсни топлинни натоварвания (микросекунди), изборът на материал трябва да се базира единствено на механични свойства и цена, а не на топлопроводност.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Bergman, T. L., et al. "Fundamentals of Heat and Mass Transfer." John Wiley, 2011.

[2] Incropera, F. P., et al. "Principles of Heat and Mass Transfer." John Wiley, 2013.

[3] ANSYS Mechanical User's Guide, Release 2025 R1. Available at : https: // ansyshelp. ansys. Com (Accessed on: 16. 08. 2026г.).