



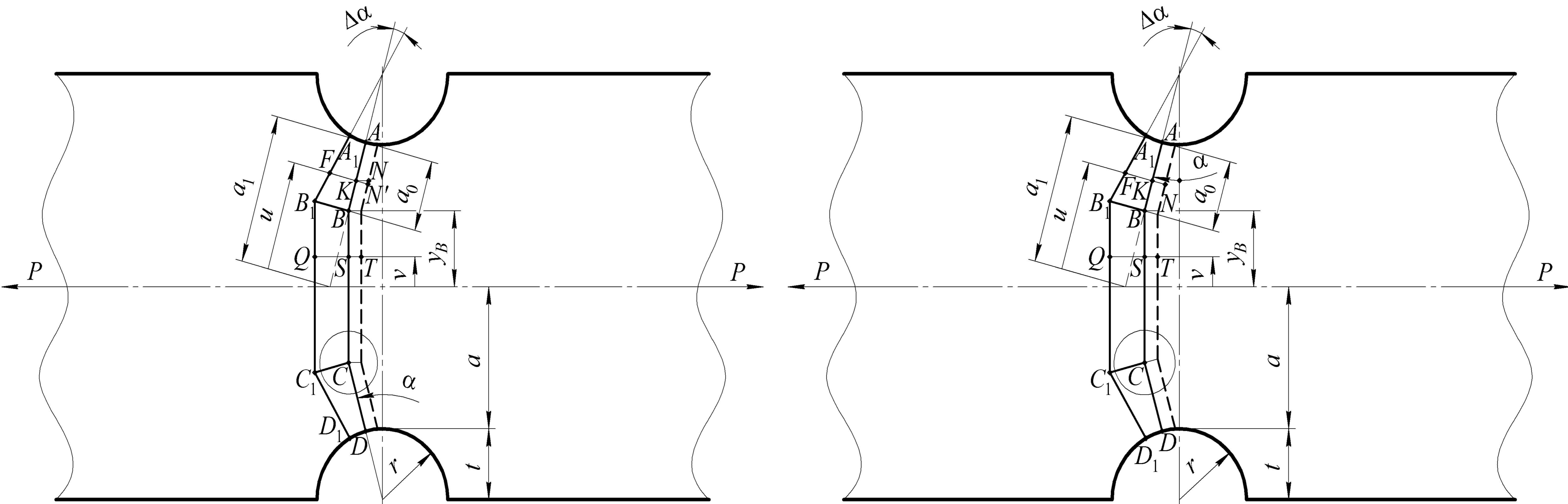
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона

МОЛТАСОВ АНДРІЙ ВАЛЕРІЙОВИЧ
МОТРУНІЧ СВЯТОСЛАВ ІГОРОВИЧ

**РОЗРОБКА НОВИХ АНАЛІТИЧНИХ МЕТОДІВ
РОЗРАХУНКУ НАПРУЖЕНЬ В ЗОНАХ КОНЦЕНТРАЦІЇ
ТОНКОЛИСТОВИХ СТИКОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ**

Робота на здобуття премії Президента України для молодих вчених

МОДИФІКАЦІЯ ГІПОТЕЗИ ЛАМАНИХ ПЕРЕРІЗІВ ПРИ РОЗТЯГУ



Поступальне переміщення ламаного перерізу $ABCD$ у пластині з вирізами при її розтягу за класичною (зліва) та за модифікованою (справа) гіпотезою ламаних перерізів

Класична гіпотеза

Модифікована гіпотеза

Напруження в точці C на ділянці CD

$$\sigma_{uC}^T = \frac{P \cdot \cos \alpha}{2 \left(\cos^3 \alpha \cdot (r + a_0) \cdot \ln \frac{r + a_0}{r} + y_B \right)}$$

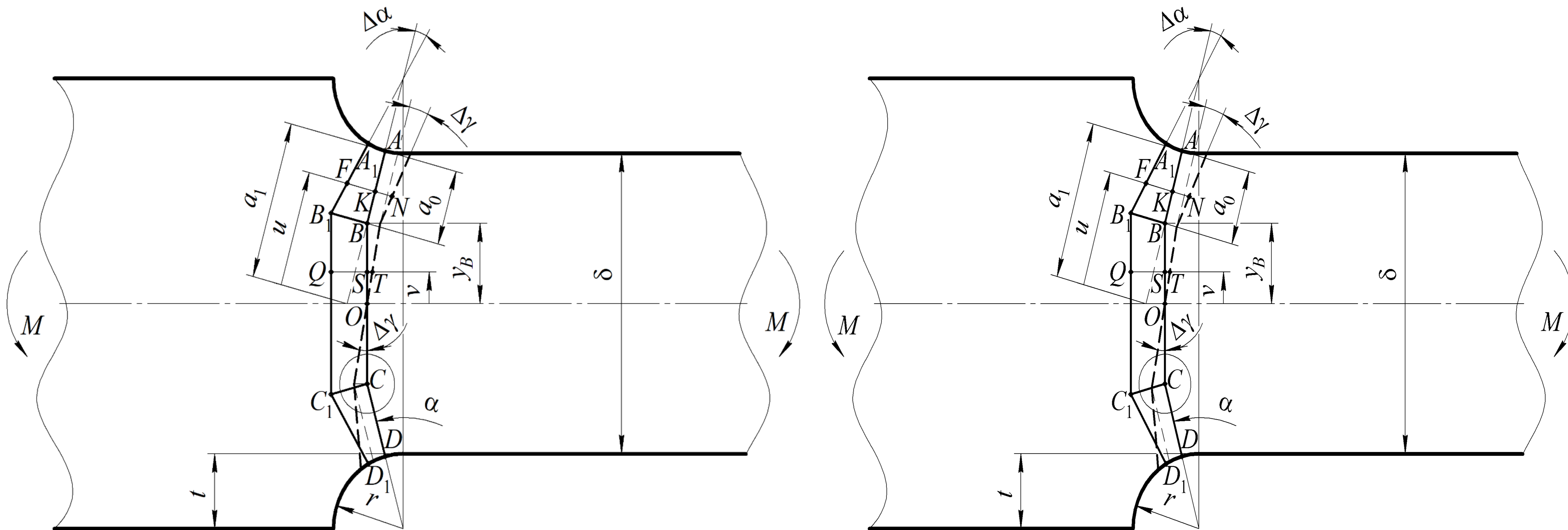
$$\sigma_u^T = \frac{P}{2 \left(\cos \alpha \cdot (r + a_0) \cdot \ln \frac{r + a_0}{r} + y_B \right)}$$

Напруження в точці C на ділянці BC

$$\sigma_v^T = \frac{P}{2 \left(\cos^3 \alpha \cdot (r + a_0) \cdot \ln \frac{r + a_0}{r} + y_B \right) \cos \alpha}$$

$$\sigma_v^T = \frac{P}{2 \left(\cos \alpha \cdot (r + a_0) \cdot \ln \frac{r + a_0}{r} + y_B \right)}$$

МОДИФІКАЦІЯ ГІПОТЕЗИ ЛАМАНИХ ПЕРЕРІЗІВ ПРИ ЗГИНАННІ



Поворот ламаного перерізу $ABCD$ у пластині з вирізами при її згинанні за класичною (зліва) та за модифікованою (справа) гіпотезою ламаних перерізів

Класична гіпотеза

Напруження в точці B на ділянці AB

$$\sigma_{uB}^B = \frac{M \cdot y_B \cdot \cos \alpha}{2(r + a_0) \cdot B_0}$$

Напруження в точці B на ділянці BC

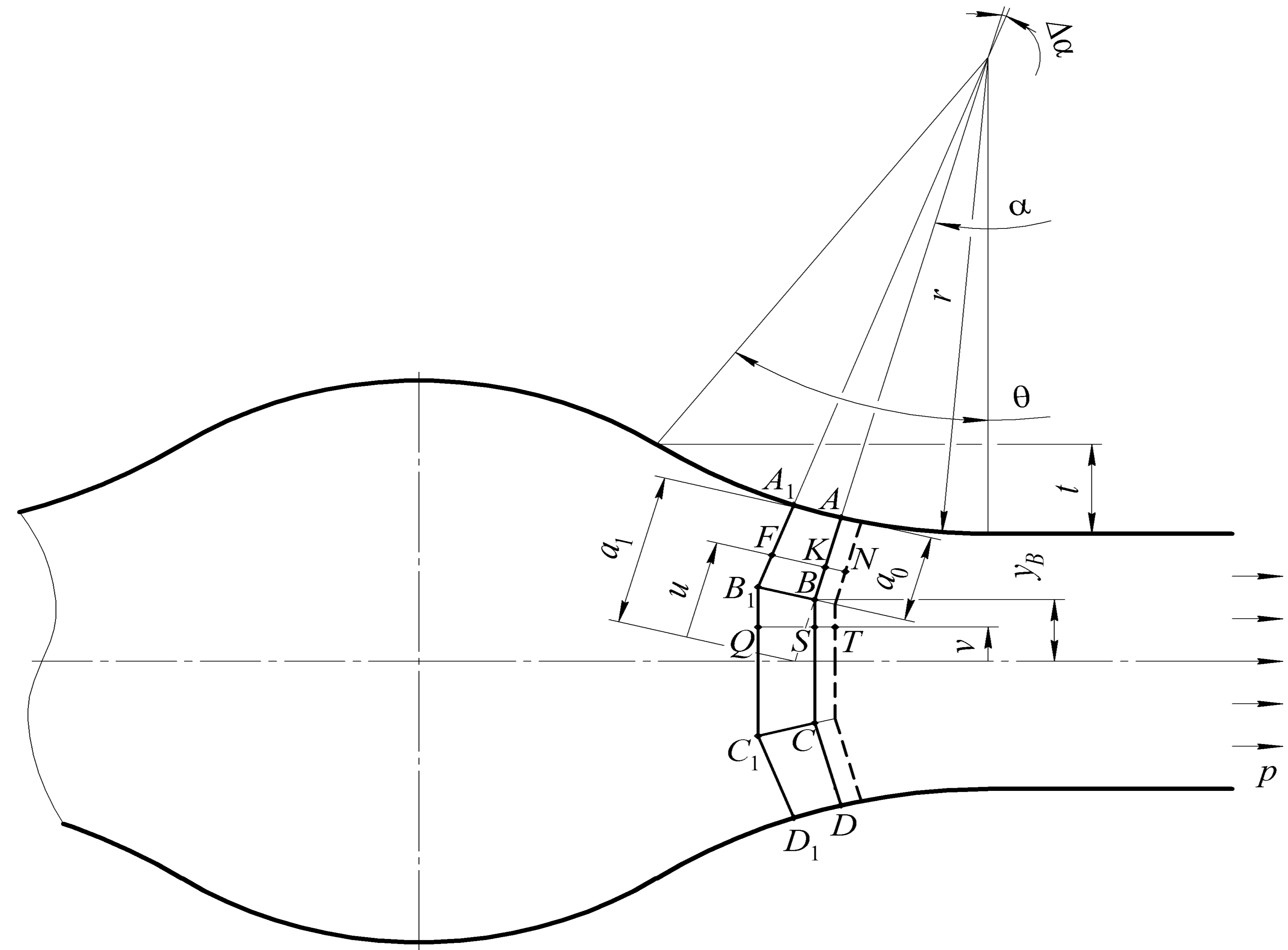
$$\sigma_{vB}^B = \frac{M \cdot y_B}{2(r + a_0) \cdot B_0 \cdot \cos \alpha}$$

Модифікована гіпотеза

$$\sigma_{uB}^B = \frac{M \cdot y_B}{2(r + a_0) \cdot B_0 \cdot \cos \alpha}$$

$$\sigma_{vB}^B = \frac{M \cdot y_B}{2(r + a_0) \cdot B_0 \cdot \cos \alpha}$$

КОНЦЕНТРАЦІЯ НАПРУЖЕНЬ У З'ЄДНАННЯХ З ДВОСТОРОННІМ СИМЕТРИЧНИМ ШВОМ ПРИ ОСЬОВОМУ РОЗТЯГУ



Побудова ламаних перерізів в зонах концентрації стикового зварного з'єднання з симетричним підсиленням та поступальне переміщення перерізу ABCD при його розтягу

Коефіцієнти концентрації напружень
при $a_0 \leq a_1$

$$\alpha_{\sigma}^T = \frac{\delta \cdot (r + a_0)}{r \left[2(r + a_0) \cdot \ln \frac{r + a_0}{r} + \delta - 2a_0 \right]}$$

при $a_0 > a_1$

$$\alpha_{\sigma}^T = \frac{\delta}{2r \cdot \ln \frac{2r + \delta}{2r}}$$

Параметр глибини концентратора

$$a_0 = 4\sqrt{2} \frac{r \cdot h}{\sqrt{g^2 + 4h^2}}$$

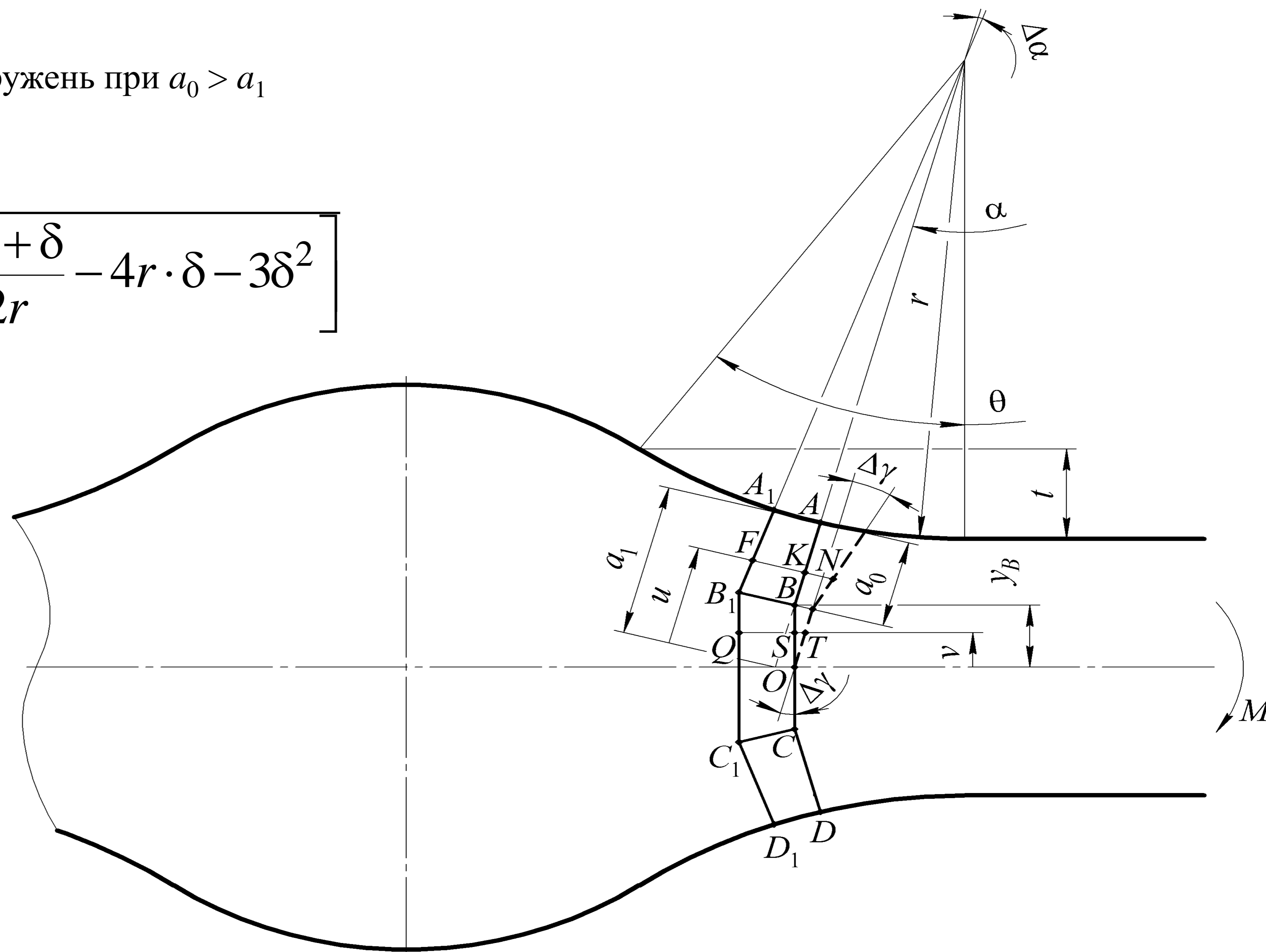
Параметр ламаного перерізу

$$a_1 = \frac{\delta + 2r(1 - \cos \alpha)}{2 \cos \alpha}$$

КОНЦЕНТРАЦІЯ НАПРУЖЕНЬ У З'ЄДНАННЯХ З ДВОСТОРОННІМ СИМЕТРИЧНИМ ШВОМ ПРИ ЗГИНАННІ

Коефіцієнт концентрації напружень при $a_0 > a_1$

$$\alpha_{\sigma}^B = \frac{\delta^3}{3r \cdot \left[2(2r + \delta)^2 \cdot \ln \frac{2r + \delta}{2r} - 4r \cdot \delta - 3\delta^2 \right]}$$



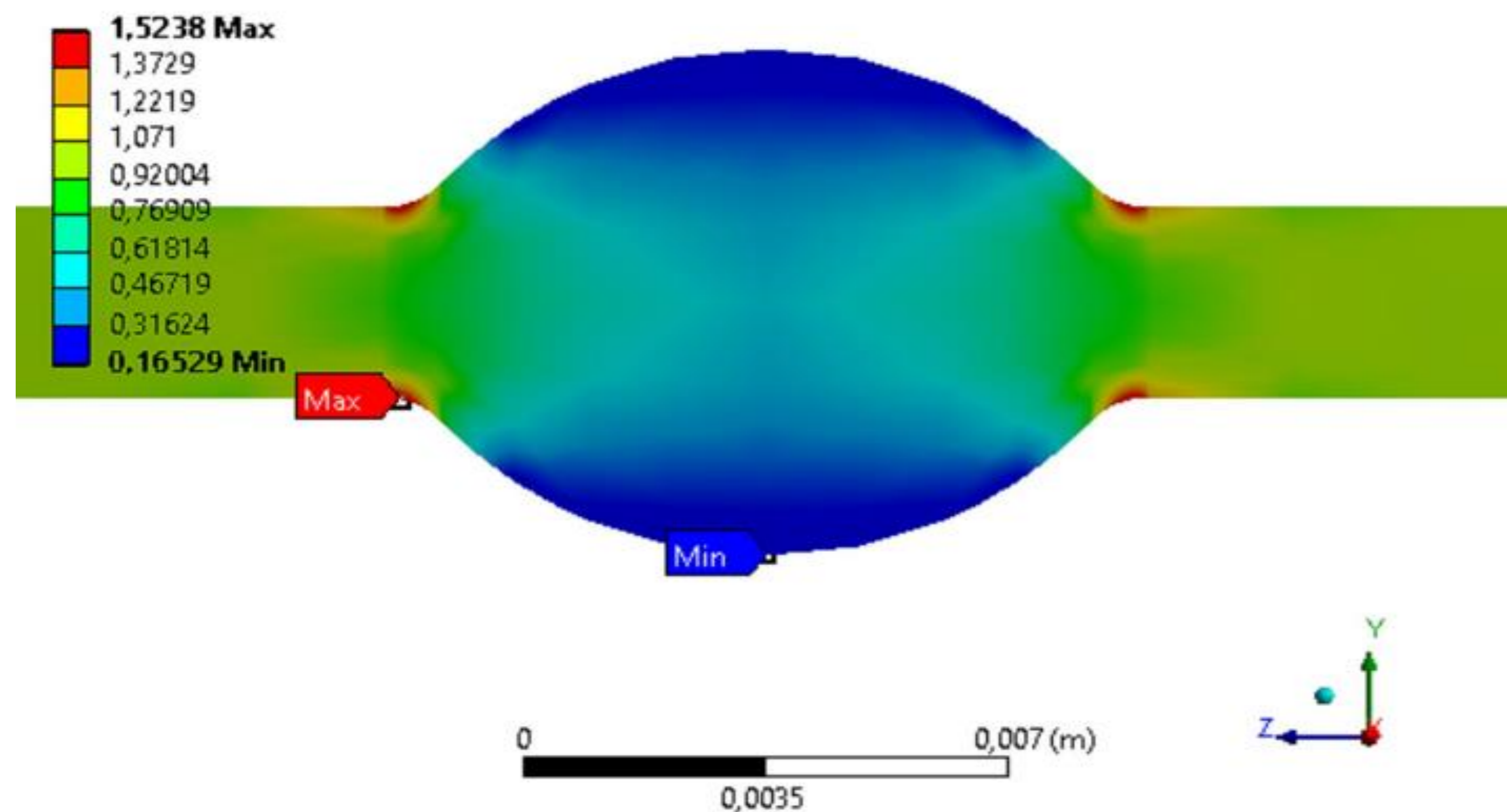
Поворот ламаного перерізу $ABCD$ в зоні розтягу при згинанні стикового зварного з'єднання з симетричним підсиленням

Коефіцієнти концентрації напружень при $a_0 \leq a_1$

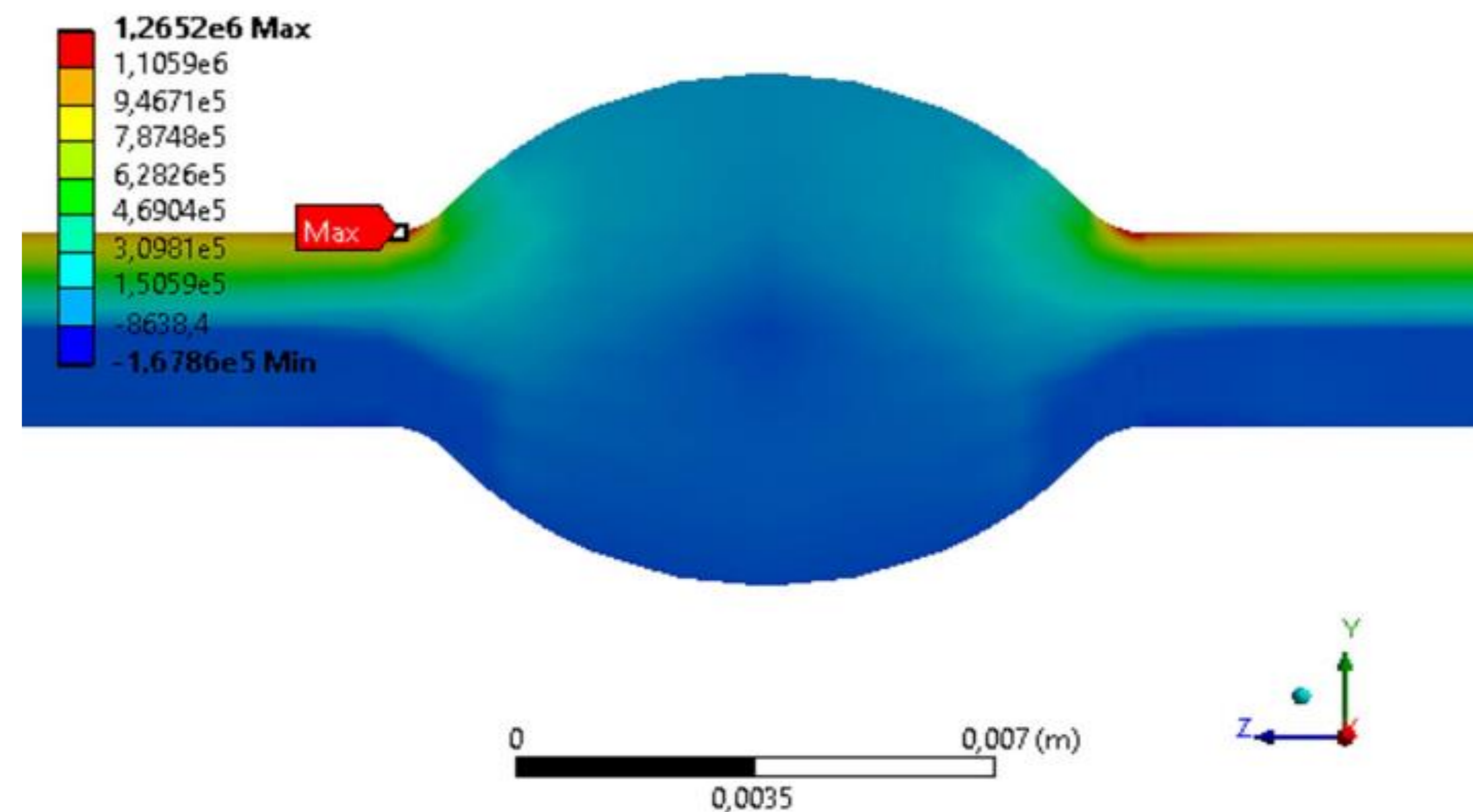
$$\alpha_{\sigma}^B = \frac{\delta^3}{24r \cdot \left[\left(r + \frac{\delta}{2} \right)^2 \cdot \ln \frac{r + a_0}{r} - a_0 \cdot (r + \delta) + \frac{a_0^2}{2} + \frac{(\delta - 2a_0)^3}{24(r + a_0)} \right]}$$

ОБЛАСТЬ ДОСТОВІРНОСТІ ОТРИМАНИХ ФОРМУЛ

A: 1-Tensile
Maximum Principal Stress
Type: Maximum Principal Stress
Unit: Pa
Time: 1
28.02.2017 14:53



N: 1-Bending
Maximum Principal Stress
Type: Maximum Principal Stress
Unit: Pa
Time: 1
28.02.2017 14:58

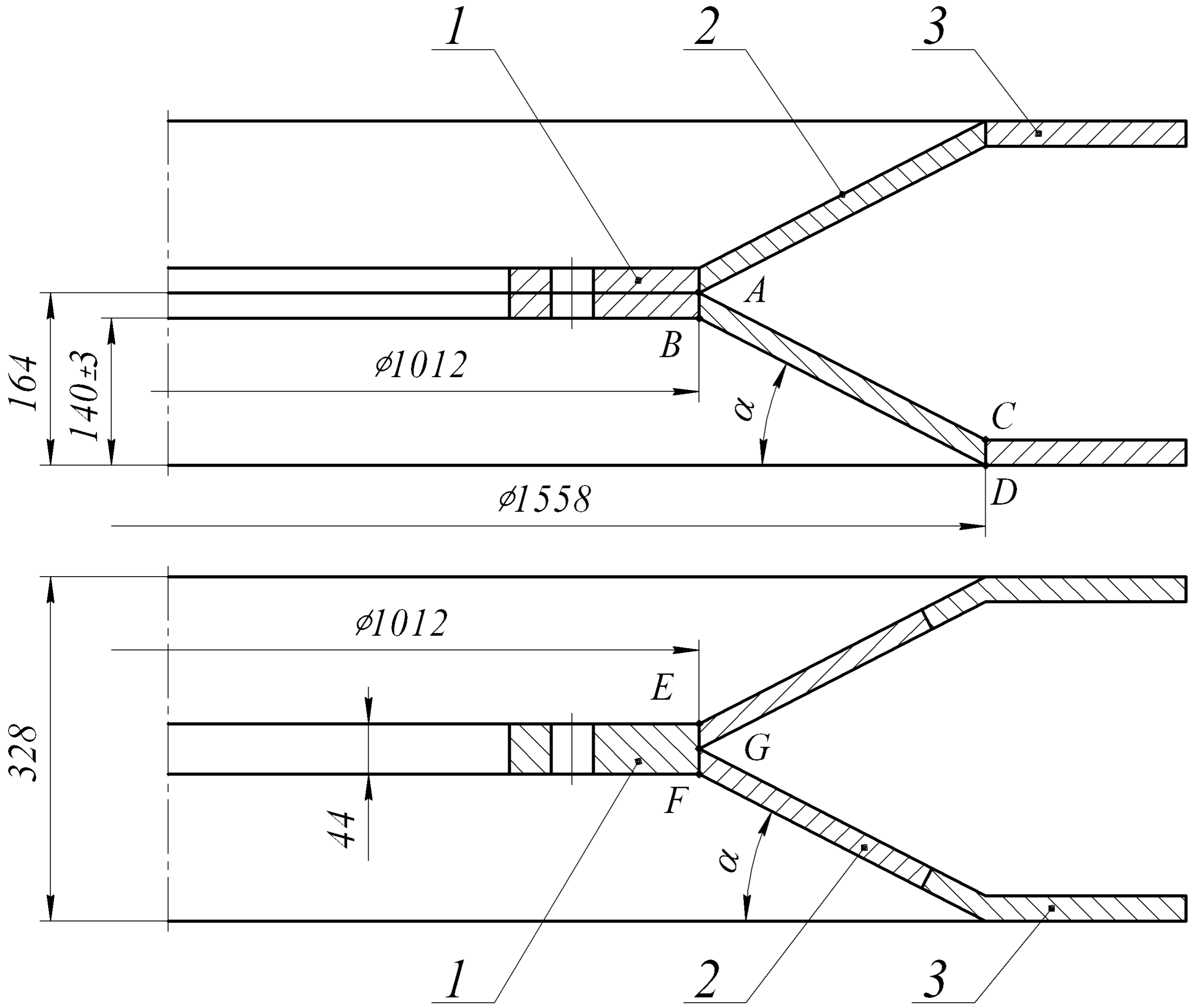


Результати чисельних розрахунків полів напружень в стиковому зварному з'єднанні ($\delta = 3$ мм, $r = 1,2$ мм, $h = 2,5$ мм, $g = 10$ мм) методом скінченних елементів (МСЕ) при розтягуванні (зліва) та згинанні (справа)

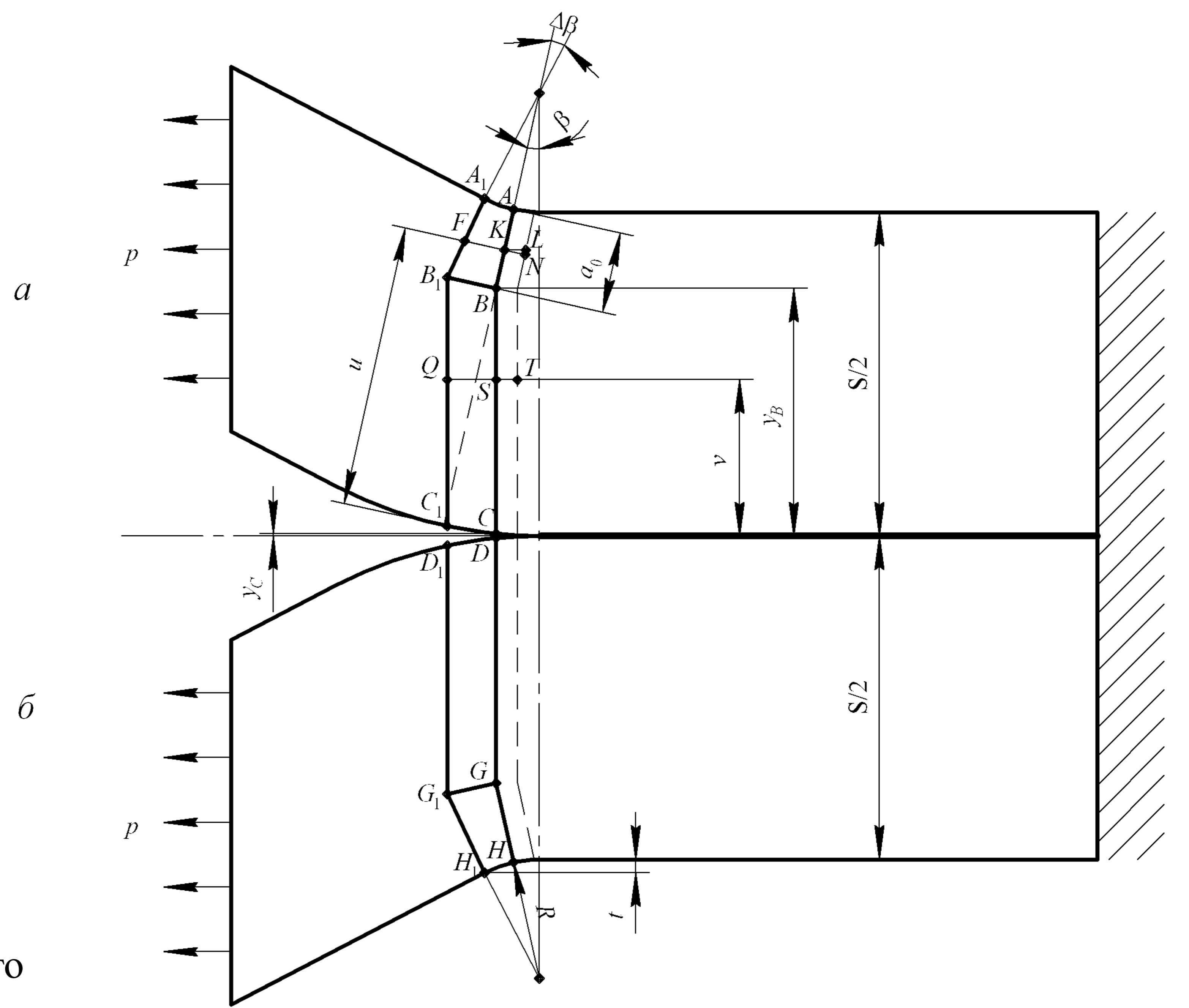
Порівняння результатів аналітичного і чисельного розрахунків ККН

Зведений радіус, r/δ	ККН при розтягу (теорія)	ККН при розтягу (МСЕ)	Відхилення ККН при розтягу, %	ККН при згинанні (теорія)	ККН при згинанні (МСЕ)	Відхилення ККН при згинанні, %
0,4	1,536	1,5238	+0,8	1,273	1,2652	+0,62
0,6	1,375	1,36	+1,1	1,188	1,1773	+0,91
0,8	1,287	1,2827	+0,34	1,145	1,1421	+0,25
1	1,233	1,2318	+0,1	1,117	1,118	-0,09
1,2	1,196	1,1974	-0,12	1,099	1,101	-0,18
1,6	1,149	1,151	-0,17	1,075	1,0795	-0,42
2	1,12	1,1222	-0,2	1,06	1,0658	-0,54
2,2	1,11	1,1106	-0,05	1,055	1,0608	-0,55
2,4	1,101	1,1022	-0,11	1,051	1,0564	-0,51
2,6	1,093	1,0935	-0,05	1,047	1,0527	-0,54

ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОГО МЕТОДУ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ЗВАРНОГО ДИСКУ РОБОЧОГО КОЛЕСА ДИМОСОСА



Можливі варіанти (а та б) конструктивного оформлення зварного диску: 1 – кільце; 2 – обичайка; 3 – окантовка



Побудова ламаних перерізів в місцях розташування концентраторів напружень

Закономірності зміни коефіцієнту концентрації напружень

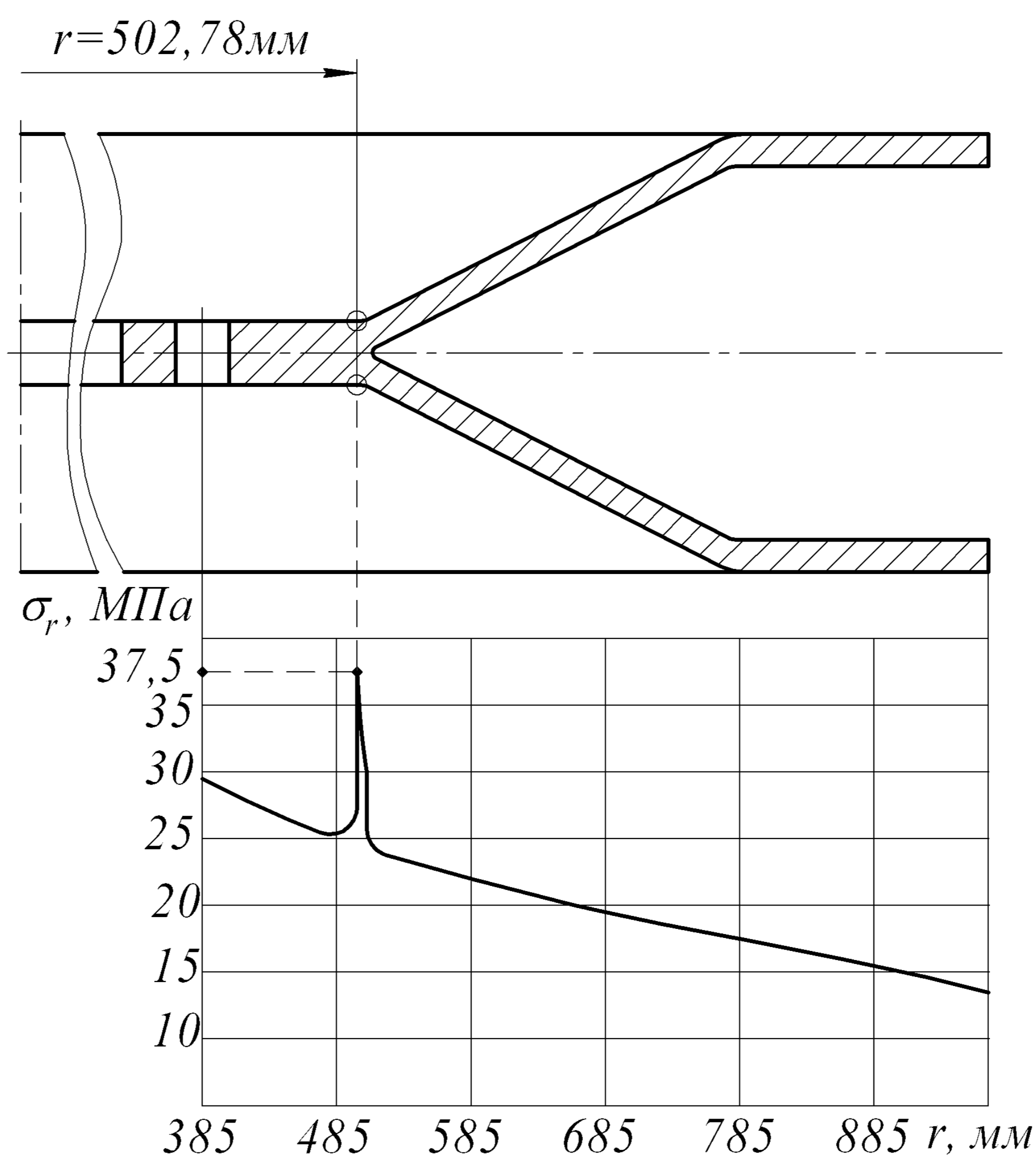
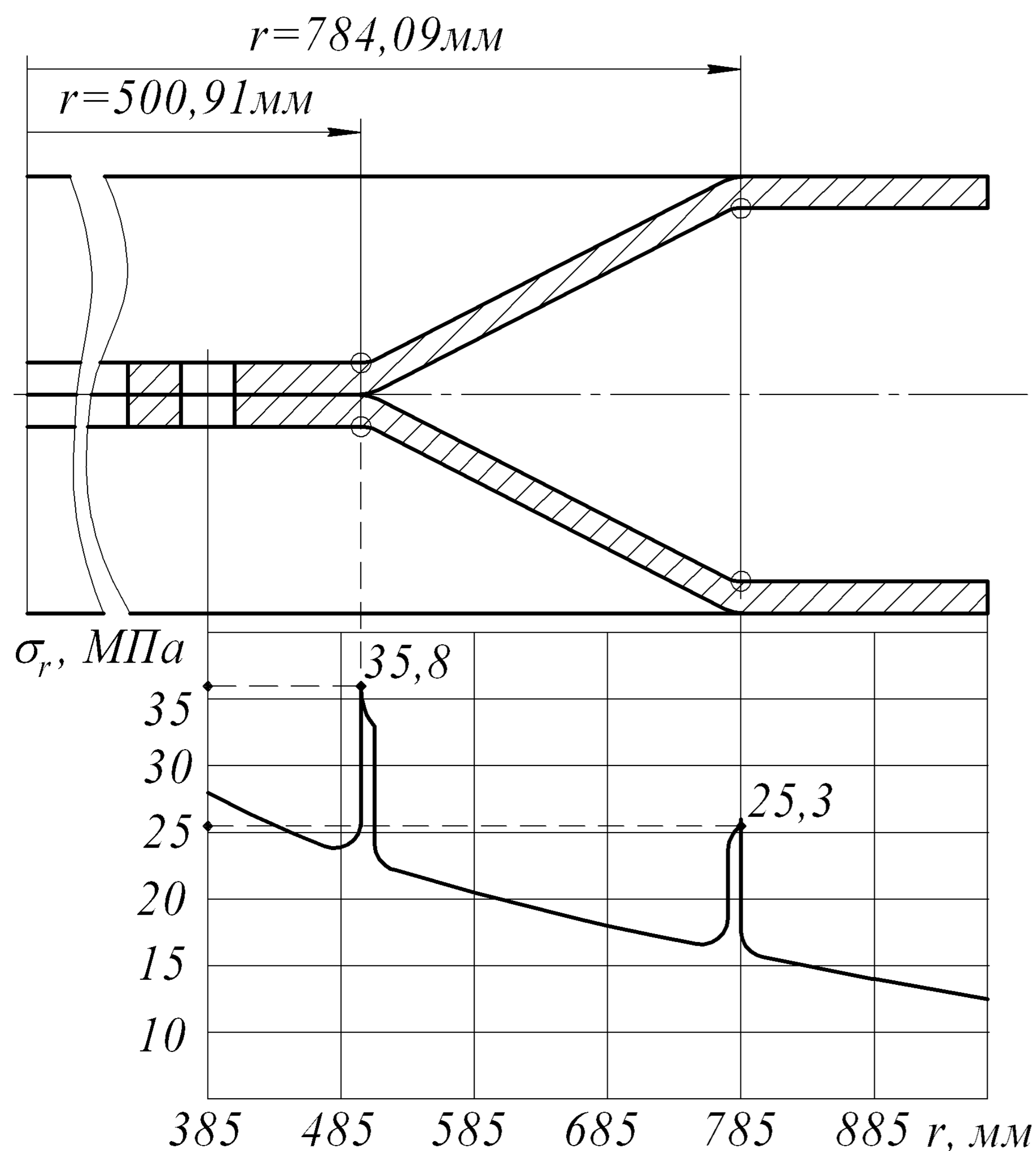
для варіанту а

$$\alpha_{\sigma} = \frac{s \cdot \cos \beta}{2R \cdot \left[\ln \left(1 + \frac{a_0}{R} \right) \cdot \cos^2 \beta + \frac{s/2 - a_0}{R + a_0} \right]}$$

для варіанту б

$$\alpha_{\sigma} = \frac{s \cdot \cos \beta}{2R \cdot \left[\ln \left(1 + \frac{a_0}{R} \right) \cdot \cos^2 \beta + \frac{s/2 + R(1 - \cos \beta) - a_0 \cdot \cos \beta}{(R + a_0) \cdot \cos \beta} \right]}$$

РОЗРАХУНОК НАПРУЖЕНЬ ДЛЯ РІЗНИХ ВАРІАНТІВ ДИСКА ТА ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАТВЕРДЖЕНОГО ВАРІАНТУ



«Затверджую»
Генеральний директор
ТОВ «Союзенергомаш»
А.М. САМАРСЬКИЙ
«31» січня 2017 р.

«Затверджую»
Заст. директора ІЕЗ ім. С.О. Патона
академії НАН України
Л.М. ЛОБАНОВ
«19» січня 2017 р.

АКТ

Про використання, розробленого в ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України, нового методу розрахунку напруженого стану в зонах концентрації напружень, викликаній геометричною неоднорідністю конструктивних елементів в околі зварних швів, який дозволяє проводити перевіряючі розрахунки на статичну міцність зварних конструкцій

Ми, що підписалися нижче, представники ТОВ «Союзенергомаш» начальник технічного відділу ГОГОЛЄВ О.Я., головний зварювальник АВДЮШКІН А.О. – з одного боку та представники ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України – науковий співробітник відділу № 3 «Міцність зварних конструкцій», к.т.н. МОЛТАСОВ А.В., старший науковий співробітник відділу № 3 «Міцність зварних конструкцій», к.т.н., доц. ТКАЧ П.М. з іншого боку, склали дійсний акт про те, що на ТОВ «Союзенергомаш» були використані та задіяні методи розрахунку напруженого стану в зонах концентрації напружень, викликаній геометричною неоднорідністю конструктивних елементів в околі зварних швів, при конструюванні та оцінці статичної міцності конструкції зварного диска робочого колеса димососа для Ладижинської ТЕС ПАТ «ДТЕК Західенерго». Використання розрахунків дозволило раціонально підібрати зварну конструкцію диска, яка відповідає вимогам щодо міцності та надійності.

Від ТОВ «Союзенергомаш»
Начальник технічного відділу
О.Я. ГОГОЛЄВ

Головний зварювальник
А.О. АВДЮШКІН

Від ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України
Науковий співробітник відділу № 3, к.т.н.
А.В. МОЛТАСОВ

Старший науковий співробітник відділу
№ 3, к.т.н., доц.
П.М. ТКАЧ

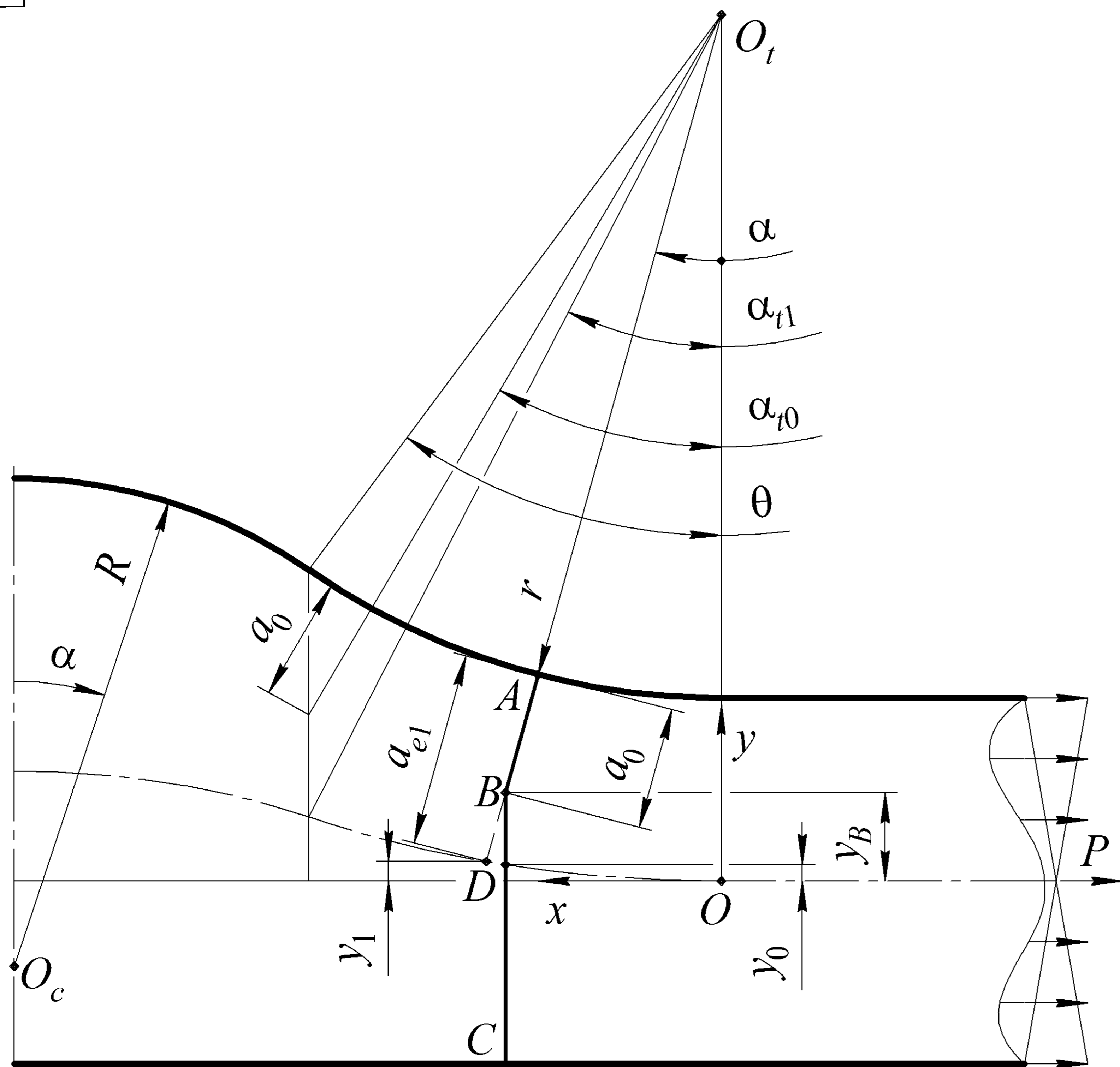
Розподіл радіальних напружень у дисках варіантів *a* (зліва) та *b* (справа)



Зовнішній вигляд робочого колеса, виготовленого на замовлення Ладижинської ТЕС ПАТ «ДТЕК Західенерго»

Акт впровадження від виробника коліс ТОВ «Союзенергомаш»

ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНЬ У З'ЄДНАННЯХ БЕЗ КОРЕНЯ ШВА



Форма та характерні розміри ламаного перерізу в зоні переходу від шва до основного металу стикового зварного з'єднання без кореня шва

Контурні напруження в зоні переходу від шва до основного металу

при $a_0 \leq a_{e1}$

$$\sigma_f^\Sigma = P \left[\frac{1}{r \cdot T_0} - \frac{(1 - \cos \alpha) \cdot (y_B - y_0 + a_0 \cdot \cos \alpha)}{2B_0 \cdot \cos \alpha} \right]$$

при $a_0 > a_{e1}$

$$\sigma_f^\Sigma = P \left[\frac{1}{r \cdot T_1} - \frac{a_{e1} (1 - \cos \alpha)}{2B_1} \right]$$

Напруження на зворотній стороні з'єднання

при $a_0 \leq a_{e1}$

$$\sigma_r^\Sigma = \frac{P}{r + a_0} \left[\frac{1}{T_0} + \frac{r(1 - \cos \alpha) \cdot (\delta + 2y_0)}{4B_0 \cdot \cos \alpha} \right]$$

при $a_0 > a_{e1}$

$$\sigma_r^\Sigma = \frac{P}{r + a_{e1}} \left[\frac{1}{T_1} + \frac{r(1 - \cos \alpha) \cdot (\delta + 2y_1)}{4B_1 \cdot \cos \alpha} \right]$$

Коефіцієнти концентрації напружень на лінії сплавлення шва з основним металом

$$\text{при } a_0 \leq a_{e1} \quad \alpha_\sigma = \frac{\delta \cdot (r + a_0)}{r \left[(r + a_0) \cdot \ln \frac{r + a_0}{r} + \delta - a_0 \right]}$$

$$\text{при } a_0 > a_{e1} \quad \alpha_\sigma = \frac{\delta}{r \cdot \left(\ln \frac{2r + \delta}{2r} + \frac{\delta}{2r + \delta} \right)}$$



Зразок для випробувань стикового зварного з'єднання алюмінієвого сплаву 1460Т1, виконаного дуговим зварюванням неплавким електродом в середовищі аргону, товщиною 1,8 мм

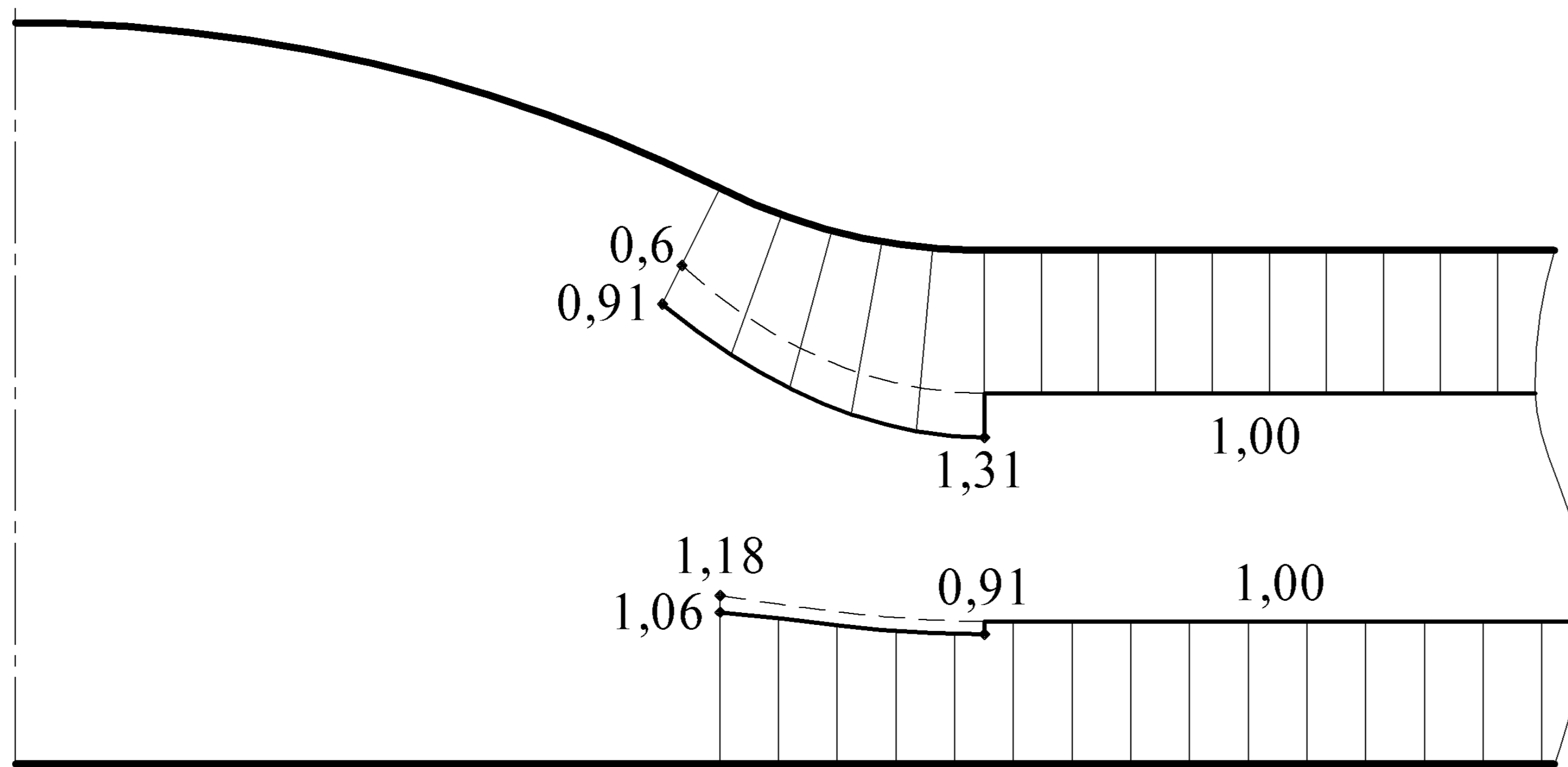


Профіль зварного шва

Результати розрахунків коефіцієнту концентрації напружень (ККН) для досліджуваної серії зразків

№ зразка	Ширина шва (g), мм	Висота шва (h), мм	Радіус переходу (r), мм	Глибина дії концентратора (a_0), мм	$a_{e1}(\theta)$, мм	ККН
1	7,0	0,6	2,75	1,31	0,98	1,24
2	7,3	0,6	2,85	1,31	0,98	1,23
3	6,9	0,8	2,12	1,35	1,01	1,30
4	6,6	0,6	2,62	1,33	0,99	1,25
5	6,8	0,8	2,08	1,35	1,02	1,31
6	6,8	0,6	2,70	1,33	0,98	1,24
7	6,6	0,6	2,62	1,33	0,99	1,25

ЧИСЕЛЬНЕ ПІДТВЕРДЖЕННЯ ОТРИМАНИХ ФОРМУЛ



Контурні епюри напружень у зразку №5, побудовані за формулами розробленого методу

«Затверджую»
 Директор ММІ НТУУ «КП»
 член-кореспондент НАН України
 М.І. БОБИР
 2017 р.

«Затверджую»
 Заступник директора ІЕЗ ім. Є.О. Патона
 академік НАН України
 Л.М. ЛОБАНОВ
 2017 р.

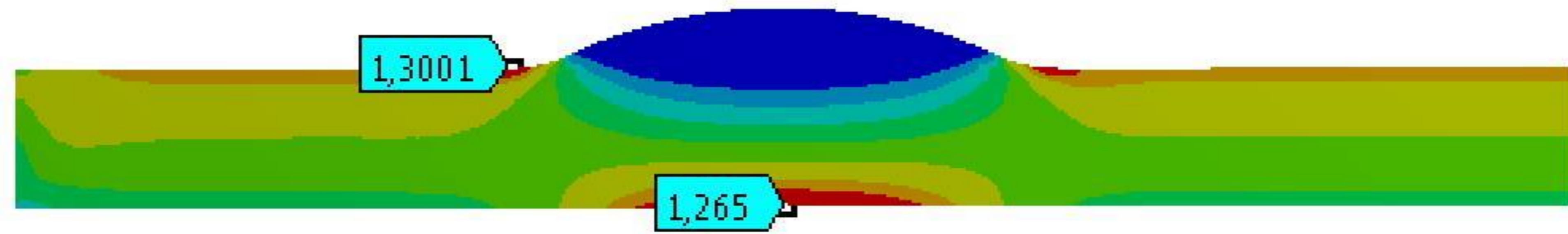
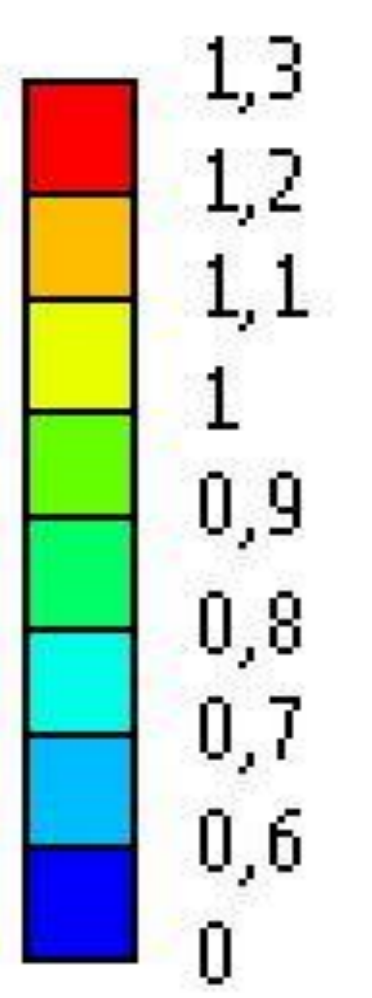
АКТ

Про використання, розроблені в ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, методики встановлення характеристик опору втомі зварних з'єднань термічнозміцнених алюмінієвих сплавів, яка дозволяє прогнозувати довговічність та оцінювати накопичені втомні пошкодження у зварних елементах конструкцій із зазначених сплавів при дії циклічних навантажень з постійними та змінними амплітудами.

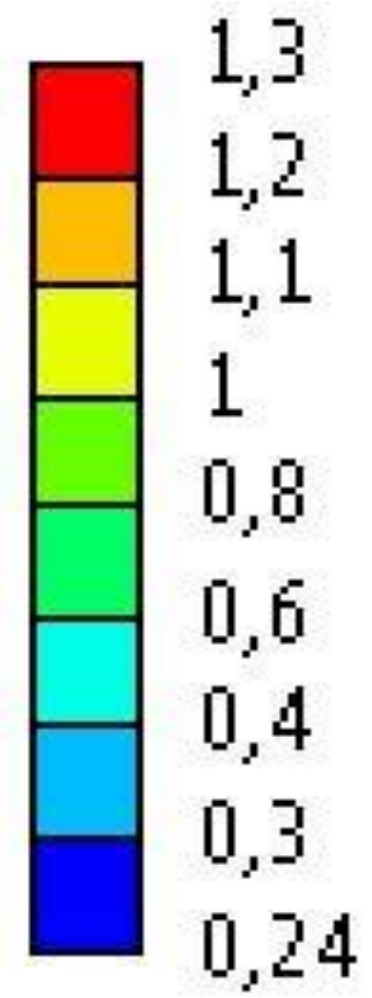
Ми, що підписалися нижче, представник ММІ НТУУ «КП» доцент кафедри «Динаміки та міцності машин та опору матеріалів», к.т.н., доц. ГРАБОВСЬКИЙ А.П. – з одного боку та представники ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України – молодший науковий співробітник відділу №3 «Міцність зварних конструкцій» МОТРУНІЧ С.І., старший науковий співробітник відділу №3 «Міцність зварних конструкцій», к.т.н. МОЛТАСОВ А.В. з іншого боку, склали даний акт про те, що на кафедрі «Динаміки та міцності машин та опору матеріалів» під час практичних занять з курсу «Теорія пошкоджуваності конструкційних матеріалів», використовуються отримані Мотрунічем С.І. результати експериментальних досліджень характеристик опору втомі зварних з'єднань тонколистових алюмінієвих сплавів, в залежності від концентрації напружень, рівня знеміцнення матеріалу в зоні з'єднання та залишкових напружень. Застосування розробленої методики дозволяє встановити особливості накопичення втомних пошкоджень при дії циклічних навантажень із постійними та змінними амплітудами в зварних елементах алюмінієвих конструкцій.

Від ММІ НТУУ «КП»
 Доцент кафедри «Динаміки та міцності машин і опору матеріалів»
 к.т.н., доц.
 А. П. ГРАБОВСЬКИЙ

Від ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України
 м.н.с. відділу № 3
 С. І. МОТРУНІЧ
 с.н.с. відділу № 3, к.т.н.
 А. В. МОЛТАСОВ



Поля напружень у зразку №5, отримані чисельним методом скінченних елементів



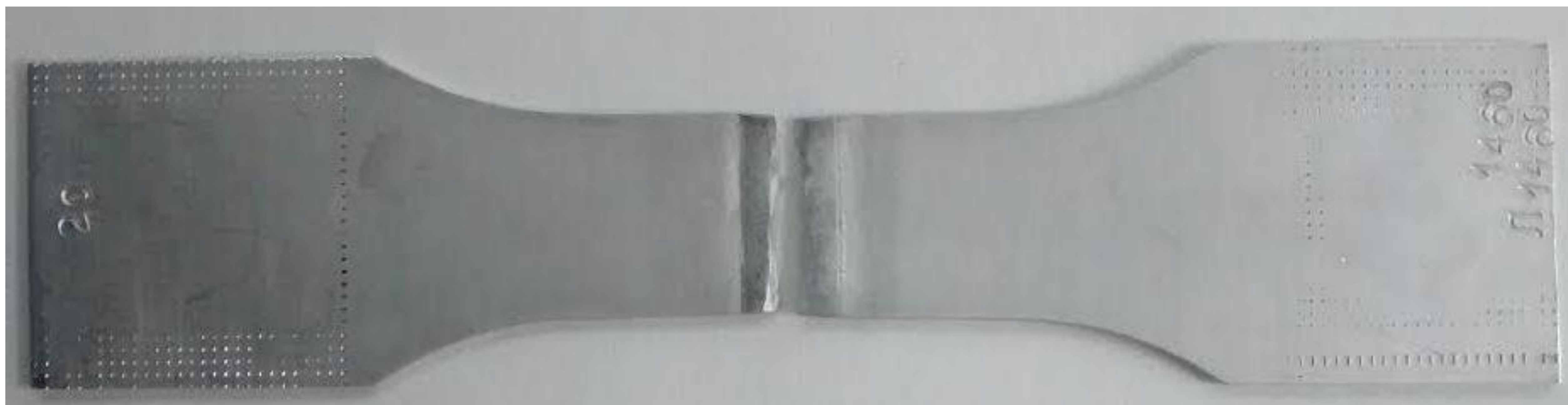
Поля напружень у зразку №2, отримані чисельним методом скінченних елементів

Акт впровадження отриманих формул в учбових процес на кафедрі «Динаміки і міцності машин та опору матеріалів» НН ММІ НТУУ «КП ім. Ігоря Сікорського»

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ПІДТВЕРДЖЕННЯ ОТРИМАНИХ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ЧИСЕЛЬНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

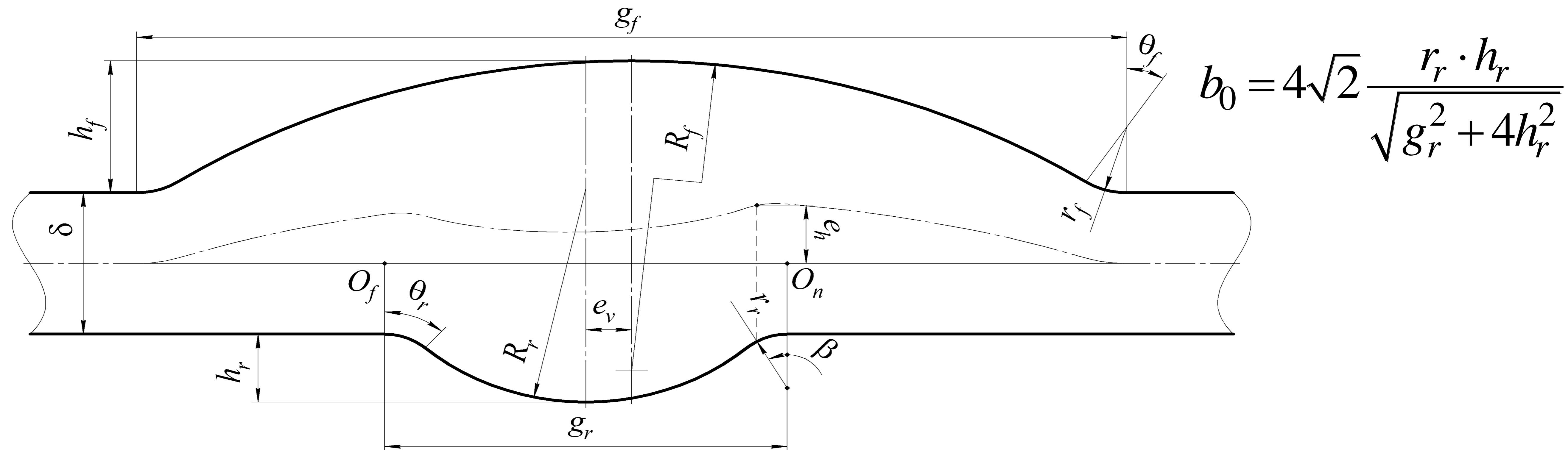


Втомне руйнування зразка №5 з високим коефіцієнтом концентрації напружень по лінії сплавлення шва з основним металом



Втомне руйнування зразка №2 з низьким коефіцієнтом концентрації напружень зі зворотної сторони зразка внаслідок дії додаткових напружень згину, зумовлених зміщенням центрів інерції на ділянці зі швом

КОНЦЕНТРАЦІЯ НАПРУЖЕНЬ В ОКОЛІ КОРЕНЯ ШВА



Геометричні параметри ідеалізованої моделі стикового зварного з'єднання, осі симетрії лицьового підсилення та кореня шва якого не співпадають

Коефіцієнти концентрації напружень на лініях сплавлення кореня шва з основним металом

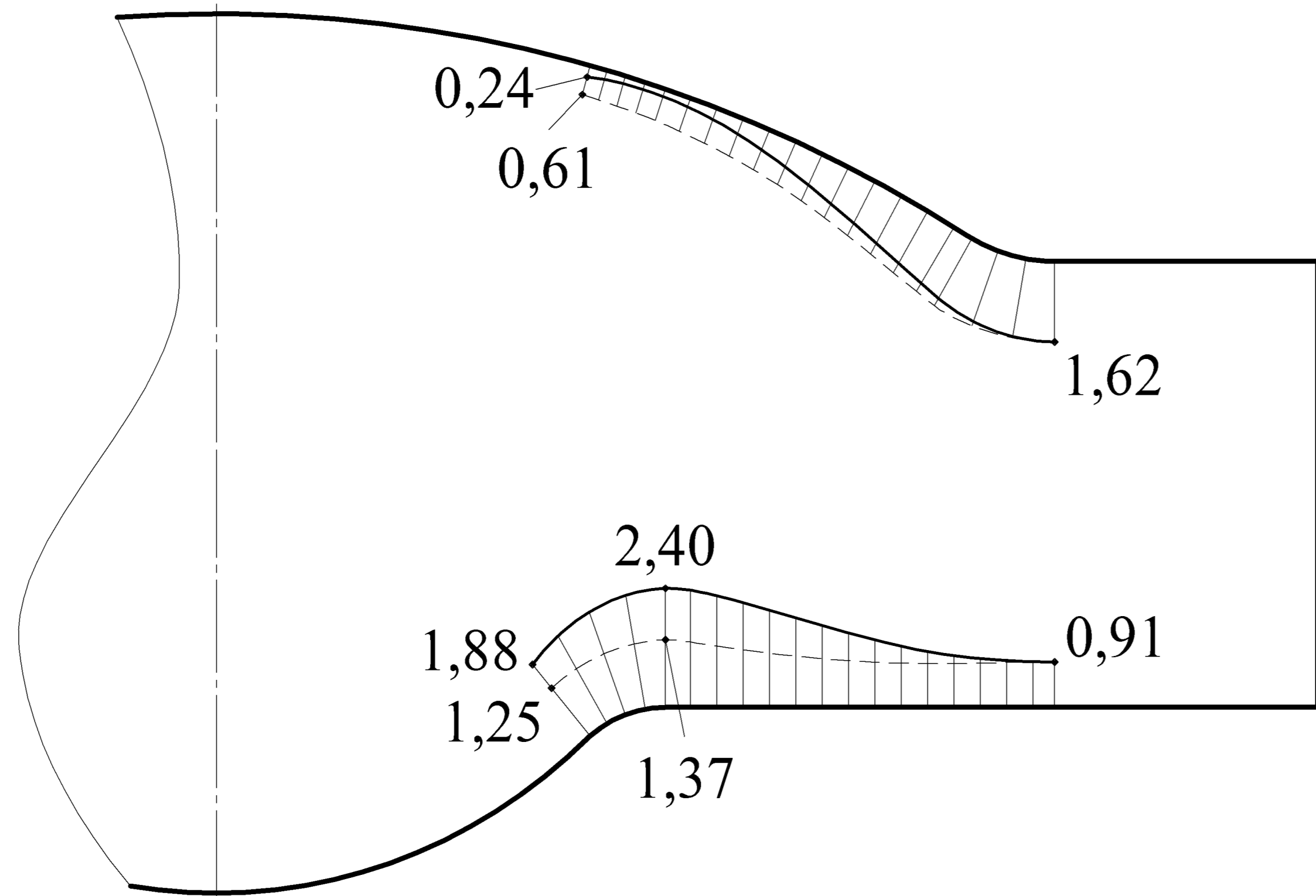
$$\text{при } b_0 \leq b_{e1} \quad \alpha_{\sigma}^r = \frac{\delta}{r_r \left(\ln \frac{r_r + b_0}{r_r} + \frac{m - b_0}{r_r + b_0} \right)} + \frac{\delta \cdot m \cdot (m - \delta)}{4r_r \left[\left(r_r + \frac{m}{2} \right)^2 \ln \frac{r_r + b_0}{r_r} - b_0 \cdot (r_r + m) + \frac{b_0^2}{2} + \frac{m^3 + (m - 2b_0)^3}{24(r_r + b_0)} \right]}$$

$$\text{при } b_0 > b_{e1} \quad \alpha_{\sigma}^r = \frac{\delta}{r_r \left(\ln \frac{2r_r + m}{2r_r} + \frac{m}{2r_r + m} \right)} + \frac{\delta \cdot m \cdot (m - \delta)}{4r_r \left[\left(r_r + \frac{m}{2} \right)^2 \ln \frac{2r_r + m}{2r_r} - \frac{m}{2} \cdot (r_r + m) + \frac{m^2}{8} + \frac{m^3}{12(2r_r + m)} \right]}$$

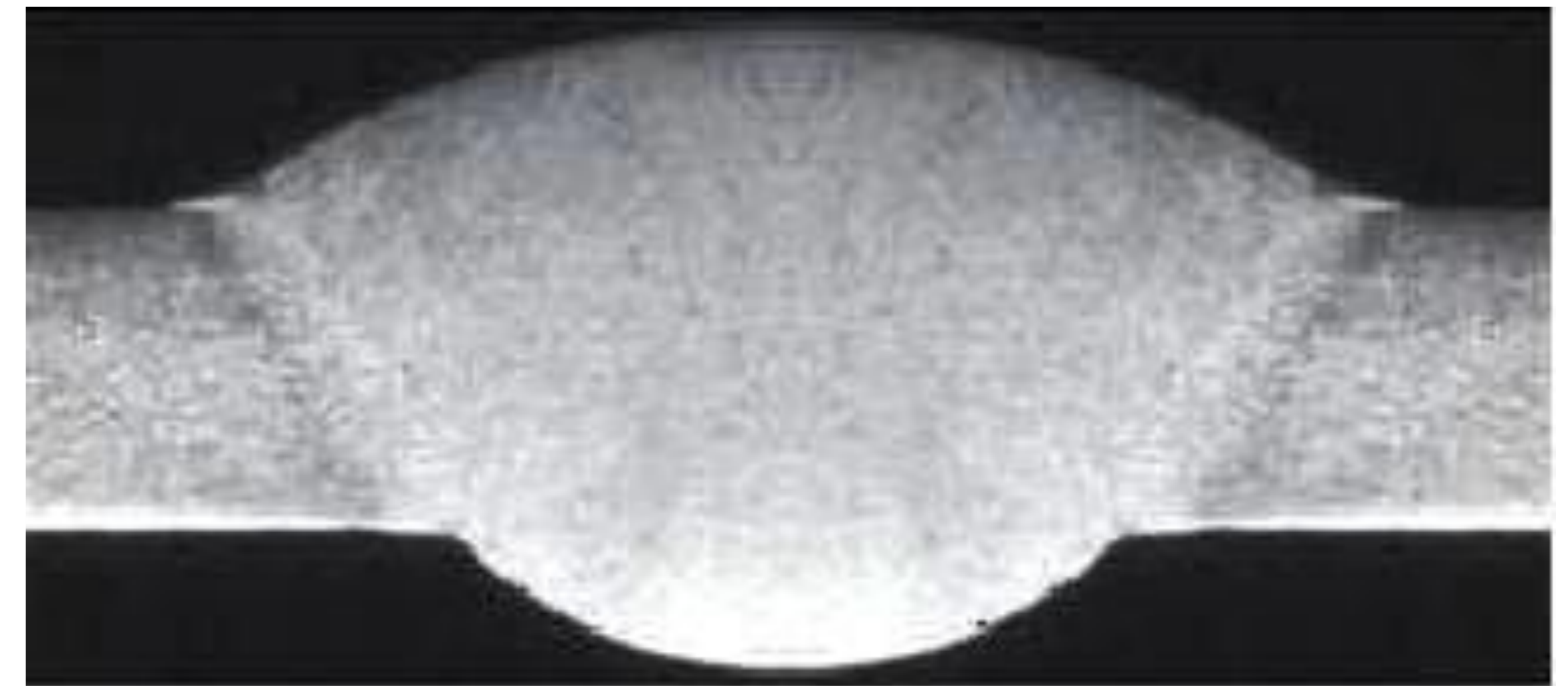
$$m = \delta + h_f - R_f + \sqrt{R_f^2 - \frac{1}{4}(g_r \mp 2e_v)} \rightarrow$$

Верхній знак перед e_v відповідає зоні переходу від кореня шва до основного металу, яка знаходиться ближче до осі симетрії лицьового підсилення, а нижній знак – зоні переходу від кореня шва до основного металу, яка знаходиться далі від неї

ЧИСЕЛЬНЕ ПІДТВЕРДЖЕННЯ ОТРИМАНИХ ФОРМУЛ ДЛЯ З'ЄДНАНЬ БЕЗ ЗМІЩЕННЯ ОСЕЙ СИМЕТРІЇ ПІДСИЛЕННЯ ТА КОРЕНЯ ШВА



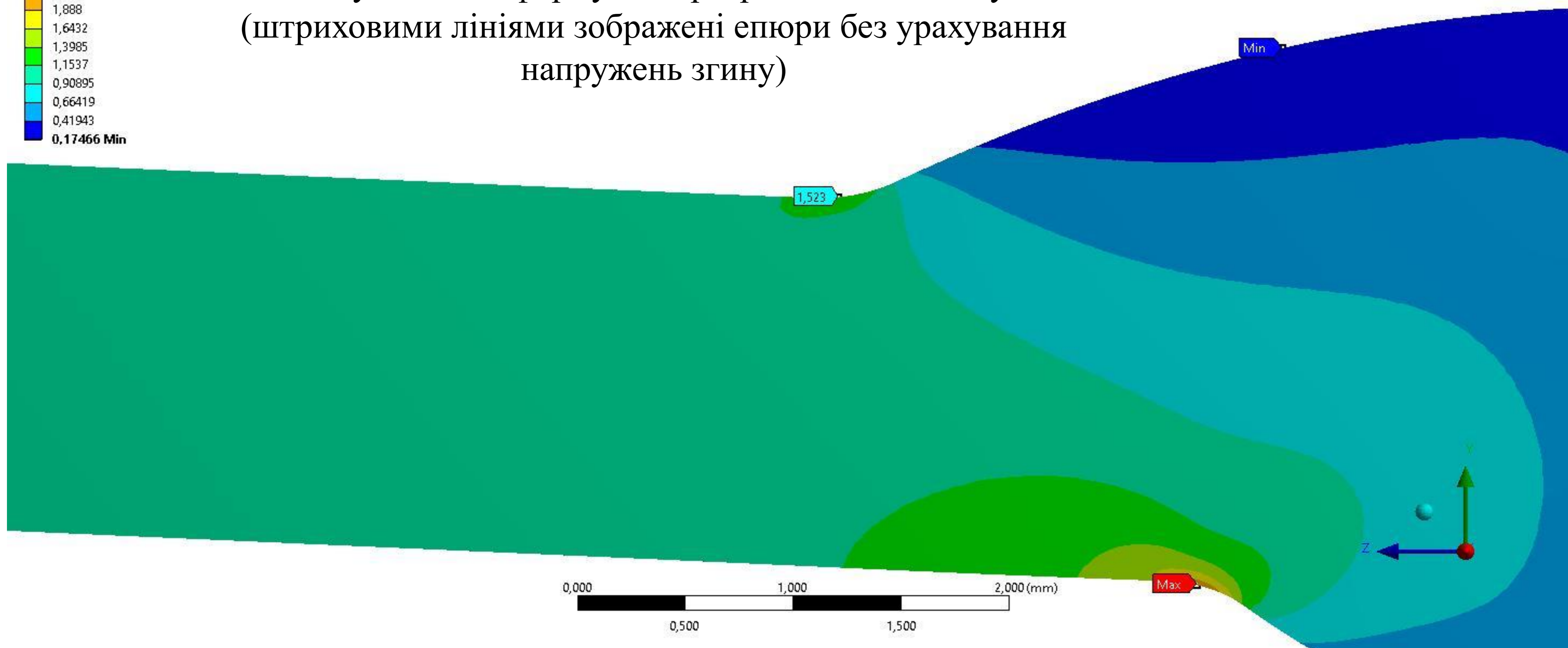
Епюри напружень в досліджуваному з'єднанні, побудовані за формулами розробленого методу (штриховими лініями зображені епюри без урахування напружень згину)



Макрошліф стикового з'єднання алюмінієвого сплаву АМг6М товщиною 1,8 мм, отриманого дуговим зварюванням неплавким електродом в аргоні

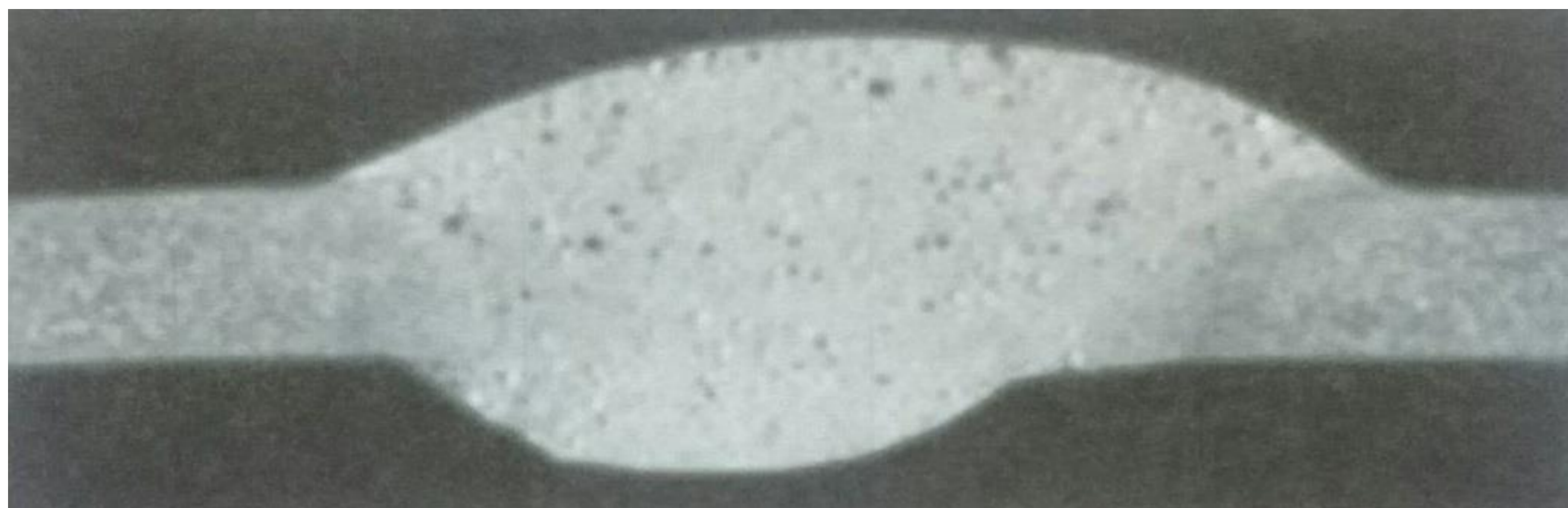
B: AMg6M_0,5 - Tensile
Maximum Principal Stress
Type: Maximum Principal Stress
Unit: MPa
Time: 1
18.10.2017 16:13

2,3775 Max
2,1328
1,888
1,6432
1,3985
1,1537
0,90895
0,66419
0,41943
0,17466 Min

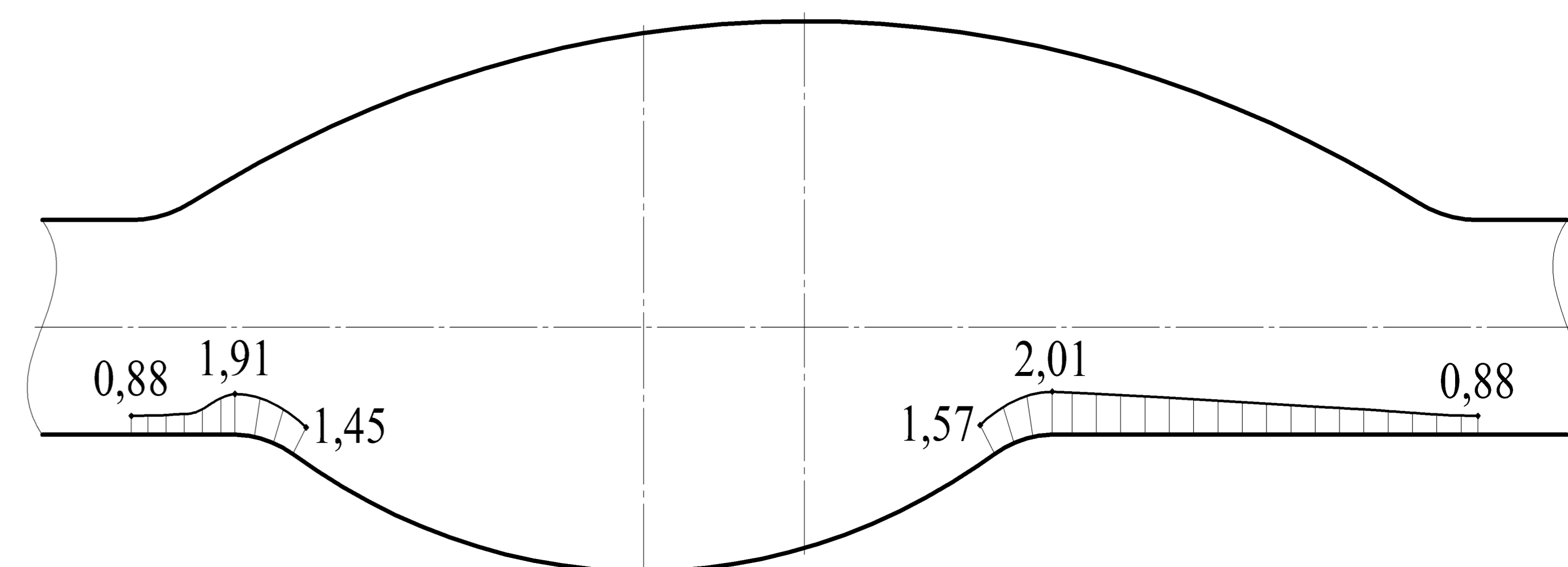


Поля напружень в досліджуваному з'єднанні, отримані чисельним методом скінченних елементів

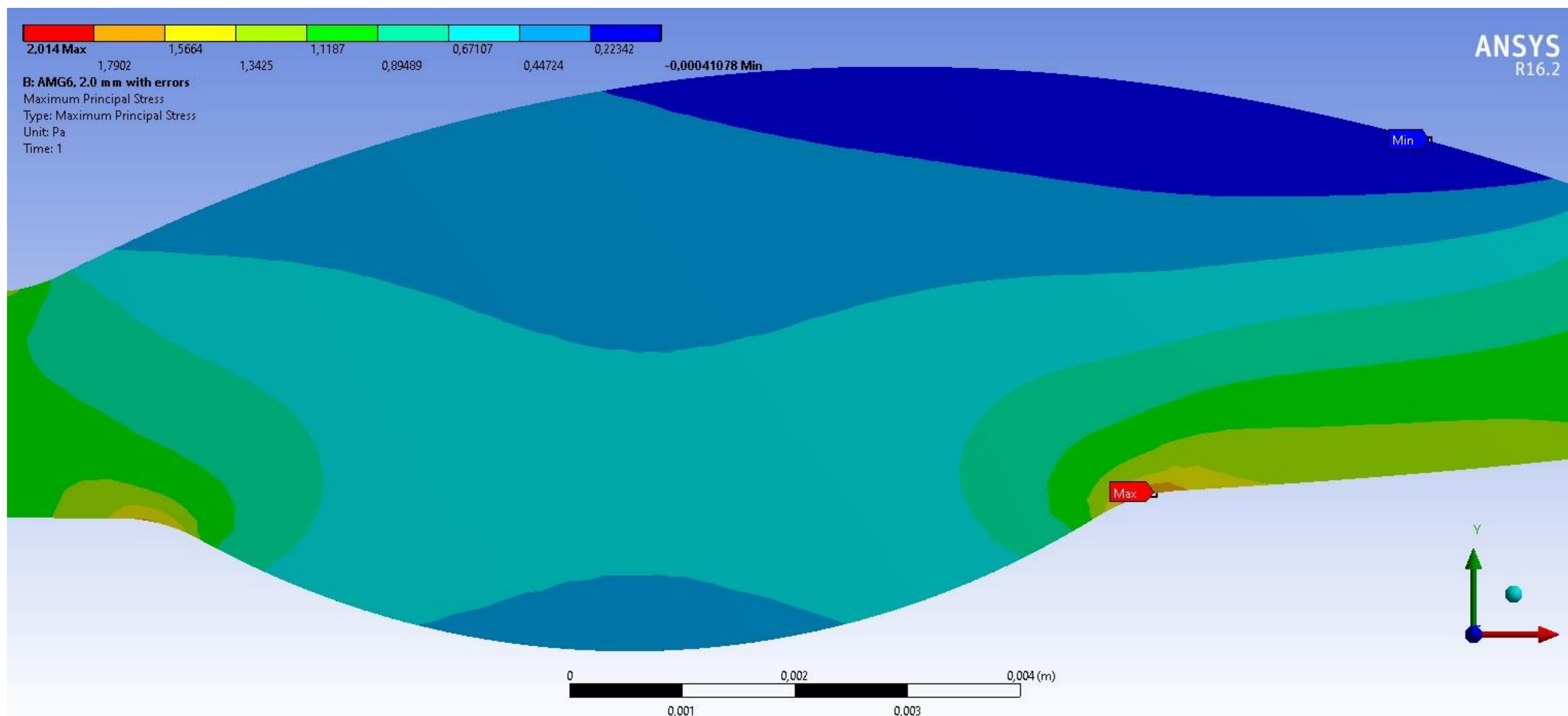
ЧИСЕЛЬНЕ ПІДТВЕРДЖЕННЯ ОТРИМАНИХ ФОРМУЛ ДЛЯ З'ЄДНАНЬ ЗІ ЗМІЩЕННЯМ ОСЕЙ СИМЕТРІЇ ПІДСИЛЕННЯ ТА КОРЕНЯ ШВА



Макрошліф стикового з'єднання алюмінієвого сплаву АМг6М товщиною 2,0 мм, отриманого імпульсно-дуговим зварюванням плавким електродом із введенням лазера



Епюри напружень в досліджуваному з'єднанні, побудовані за формулами розробленого методу



Поля напружень в досліджуваному з'єднанні, отримані чисельним методом скінченних елементів

- Розроблено новий аналітичний метод опису напруженого стану в зонах переходу від шва до основного металу при розтягуванні або згинанні стикового зварного з'єднання, виконаного двостороннім зварюванням. Встановлено, що при розрахунку коефіцієнту концентрації напружень у тонколистових з'єднаннях за формулами розробленого методу максимальне відхилення його величини для випадку розтягування складає 1,10 %, а для випадку згинання – 0,91 % в порівнянні зі значеннями, отриманими за допомогою МСЕ.
- Розроблено новий аналітичний метод дослідження напруженого стану у стикових зварних з'єднаннях без кореня шва. Встановлено, що у деяких зразках таких з'єднань внаслідок дії додаткових напружень згину, зумовлених ексцентриситетом прикладення осьового навантаження на ділянці зі швом, сумарні напруження на зворотній стороні з'єднання можуть перевищувати напруження на лінії сплавлення шва з основним металом. Шляхом експериментальних випробувань на втому зразків тонколистових стикових зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 1460T1, виконаних дуговим зварюванням неплавким електродом в аргоні, підтверджені висунуті теоретичні положення.
- Вперше розроблено аналітичний метод розрахунку напружень в околі кореня шва стикового зварного з'єднання та обґрунтовані математичні формули для визначення коефіцієнту концентрації напружень на лінії сплавлення кореня шва з основним металом. Показано, що ексцентриситет прикладення осьового навантаження на ділянці зі швом призводить до значного підвищення напружень в околі кореня шва. Враховано вплив взаємного паралельного зміщення осей симетрії підсилення та кореня шва на характер розподілу напружень в околі останнього.