

гідратації. Це дозволяє використовувати їх як інтенсифікаторами тверднення бетонів, так і протиморозних додатків, що має суттєве значення при монолітному бетонуванні.

1. Синашко Н.П., Лихопуд А.П., Саницький М.А. и др. Система химических добавок в бетоны и строительные растворы “Релаксол” // Будівельні матеріали. – 2000. – № 5. – С. 30–34. 2. Физико-химические основы формирования структуры цементного камня / Л.Г. Шпынова, В.И. Чих, М.А. Саницький и др. – Львов, 1981. – 160 с. 3. Иванова О.С., Саницький М.А., Шийко О.Я. Бетонирование в зимних условиях с применением комплексных химических добавок // Пром. строительство. – 1987. – № 12. – С. 22–23. 4. Kon E. Betowanie zimą //Polski cement. – 2000. – № 1. – S. 28–30.

УДК 624

І.В. Санніков
ЗНДІЕП, Київ

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ СТИКОВОГО З'ЄДНАННЯ КОМПОЗИТІВ В ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТАХ З ЛИСТОВОЮ ГОФРОВАНОЮ АРМАТУРОЮ

© Санніков І.В., 2002

Розглянуто конструкцію, технологію та обладнання для з'єднання композитів в залізобетонних плитах з листовою гофрованою арматурою. Для мінімізації ваги анкерних в'язів поставлена оптимізаційна задача нелінійного програмування з обмеженням на зовнішній діаметр та товщину стінки анкера. Наведено графічне розв'язання задачі.

Однією із задач проектування залізобетонної плити з листовою гофрованою арматурою є обчислення необхідної кількості анкерних в'язів між плитою та елементами балкової клітки залежно від зусиль, які діють в місцях встановлення анкерних в'язів при навантаженні плити. Необхідність в такому з'єднанні настає безпосередньо після того, як дотичні напруження по контакту “бетон-гофрований профіль” перевищують граничні значення для адгезії ($\tau_{\text{EXT}} > 0,05$ МПа). Далі анкер, як елемент такого з'єднання, сприймає всі види зусиль: розтяг, згин та зсув, які передає бетон на елементи поверхні анкера ($N_{\text{an},l}$, $N_{b,t}$), під дією згинальних моментів та поперечних сил. Визначення зусиль в елементах з'єднання детально розглянуто в працях [1–3]. Нижче (рис. 1) показана конструкція плити, схема зусиль згину від зовнішніх сил, які діють по осі ряду анкерів в поперечному напрямку, а також зусиль, які діють на один анкер.

Задача оптимізації, розглянута в статті, сформульована як задача проектування на множині допустимих значень змінних проектування одиничного трубчастого (пустотілого) анкера, який встановлений на опорі плити (сталій балці) та з'єднує композити (залізобетон, листові армування, елементи балкової клітки) плит в конструктивне ціле.

Метою проектування є вибір зовнішнього діаметра D і товщини стінки анкера t так, щоб задовольнялись обмеження:

- на форму анкера і товщину стінки із умов конструювання плит, стикового з'єднання і анкера, зварного обладнання і технології виконання зварного шва;
- на напруження розтягу бетону при вириванні анкера, розтягу і зминання бетону на поверхні анкера, згину, зрізу і розриву анкера по площі поперечного перерізу A_{an} або зварного шва $A_{an,w}$;
- на напруження розтягу листового армування при розриві по лінії установки анкерів і за цією лінією до кромки плити.

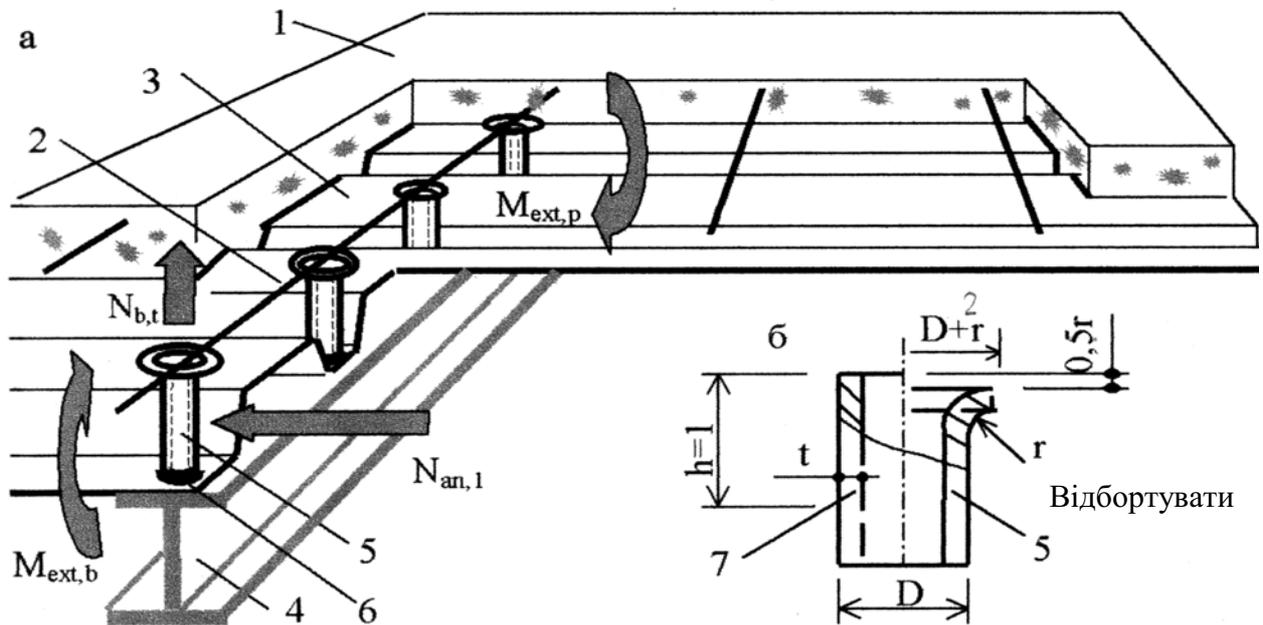


Рис. 1. Монолітна залізобетонна плита з листовою гофрованою арматурою:
 а – стикове з'єднання; б – анкер пустотілий трубчастий;
 1 – монолітний бетон; 2 – додаткове стрижневе армування;
 3 – сталевий гофрований профіль листового армування;
 4 – елемент балкової клітки; 5 – анкер; 6 – внутрішній кутівий (кільцевий)
 зварний шов; 7 – вихідна заготовка для виготовлення анкера

Конструктивні та технологічні параметри плит

Монолітні плити, армовані профільованими настилами, застосовують в перекриттях споруд для прогонів 1,5–6,0 (9,0) м та експлуатаційних навантажень 1–15 кН/м². Повна висота поперечного перерізу плит приймається від 10 до 18 (36) см або 1/22 для однопрогонових, 1/27 для крайніх і 1/32 для середніх прогонів багатопрогонових плит [1]. У всіх випадках товщина шару бетону над верхньою полицькою гофрованого профілю із умов кращого вкладання приймається не менше 30 мм.

Для виготовлення плит приймається бетонна суміш, виготовлена в змішувачах у вигляді суміші з водою, і доставлена до місця призначення в готовому для вкладання стані. Проектний клас бетону по міцності на стиск В15-В25. Використовують легкі бетони марки середньої щільності D1700-D2000, важкі середньої щільності від 22 до 25 кН/м³ включно.

Найбільша крупність заповнювача – 20 мм. Для цієї задачі прийнятий бетон проектного класу по міцності на стиск В20.

Для формування профільованих настилів застосовують профілі сталеві листові гнуті з трапецієвидними гофрами і профілі сталеві гнуті з трапецієвидними гофрами і рифами. Для цієї задачі прийнятий настил за ГОСТ 24045-86Е* з товщиною листа, яка дорівнює 0,9 мм і шириною плоскої частини нижньої полицки гофра, що дорівнює 0,38 мм. Для виготовлення анкерних виробів застосовують:

- сталь сортової полосової;
- труби сталеві електрозварні з мінімальним зовнішнім діаметром 22 мм і мінімальною товщиною стінки 1,0 мм.

Конструкція стикового з'єднання і анкер

Композити залізобетонної плити об'єднуються короткими вертикальними пустотілими анкерами діаметром 18–30 мм (рис 1, б) через 170–400 мм по довжині опорного елемента за допомогою зварного напівавтомата (рис. 2) за технологією, розробленою автором сумісно з інститутом електрозварювання ім. Е.О Патона АН України [4], з проплавленням нижньої полицки профілю. Таке анкерування ефективно забезпечує сумісну роботу композитів і сприйнятих поздовжніх зусиль профільованим настилом безпосередньо до його розриву по цілому перерізу.

Зварювальне обладнання і технологія зварювання

Зварювальний напівавтомат, показаний на рис. 2, розроблений відповідно до вимог ГОСТ 18130-79Е*. Для керування зварним процесом служить блок БУСП, який є програмним тиристорним процесором, що працює від сітки побутового електропостачання (220 В, 50 Гц).

Сутність зварювання пустотілих анкерів показана на рис 2, б. Для зварювання використовується порошковий дріт марки ППАН 19Н-А діаметром 3 мм виробництва ОЗСМ ІЕМ ім. Е.О. Патона. Для збудження зварювальної дуги і горіння її з розплавленням кромки анкера, проплавленням оцинкованого настилу і частковим – плоского елемента конструкції, перед зварюванням настил притискається до балки каркасу зварювальним напівавтоматом (гофр ширше від зовнішнього діаметра анкера). При цьому відстань між кінцем електрода (по осі) до кромки анкера в площині обрізу повинна бути в межах 2,0–2,5 мм. Далі включають зварювальний струм одночасно з подачею електрода. Ознакою позитивного процесу зварювання є наявність біжучого червоного паса. Електрод утворює зварний шов обертанням з переміщенням його кінця вздовж кромки анкера з частковим перекриттям зварного шва.

Відповідно до технології виконання зварного шва (рис. 2, б) і конструкції зварювального обладнання (рис. 2, а) форму анкера приймаємо у вигляді замкнутої циліндричної оболонки, для якої розподілення товщин по поверхні є постійним ($t = \text{const}$). Тоді мінімізований функціонал ψ_0 представляє собою вагу анкера, яка дорівнює

$$\psi_0(D,t) = \gamma t h (D - t), \quad (1)$$

де γ – питома вага матеріалу, з якого виготовляється анкер, що дорівнює 7,85; h – довжина анкера (в цьому проекті прийнята 10 см при товщині плити (h_s), яка дорівнює 12 см).

Для реального проекту накладається обмеження, щоб D і t були не від'ємними.

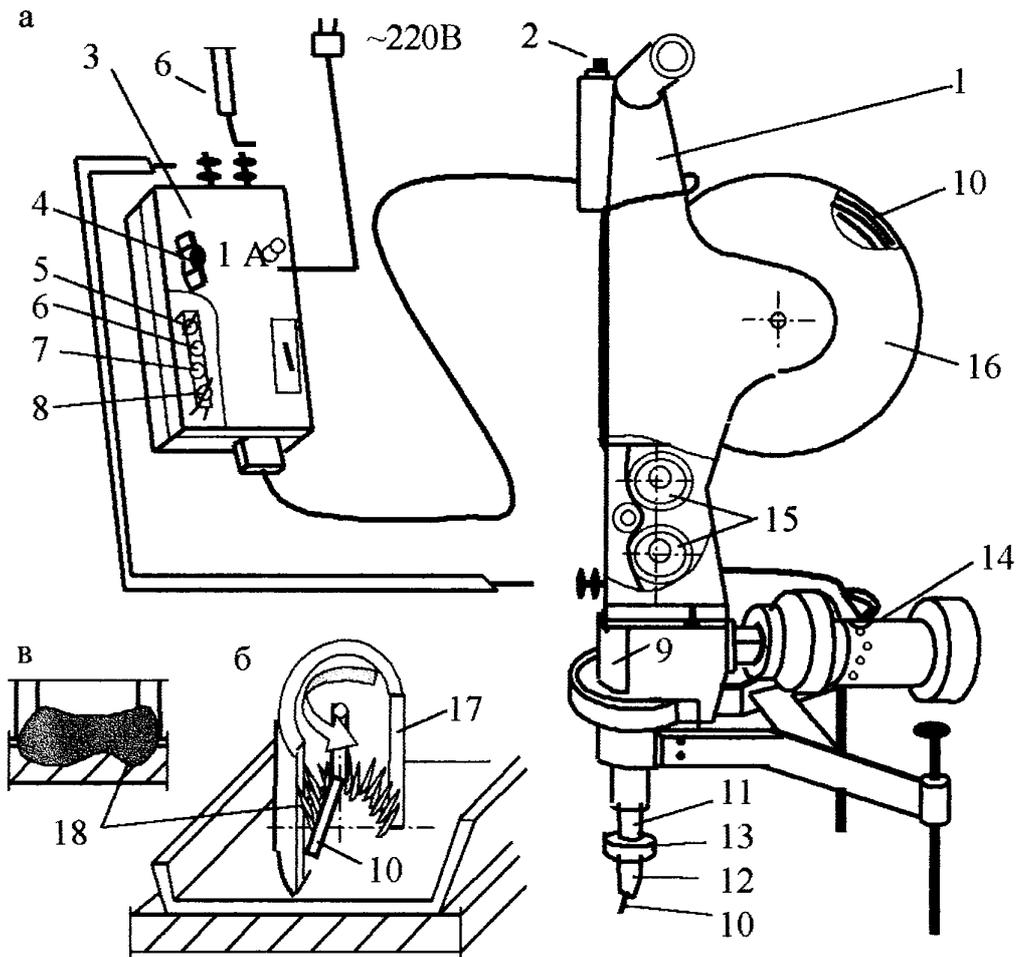


Рис. 2. Зварювальне обладнання і технологія зварювання:
 а – зварювальний напівавтомат для приварювання пустотілих анкерів
 трубчастого типу; б – виконання зварного шва; в – розріз стикового з'єднання;
 1 – зварювальна головка; 2 – кнопка “пуск” зварювального циклу; 3 – блок управління;
 4 – перемикач напружень; 5 – регулятор швидкості подачі зварювального дроту;
 6 – теж саме гальмування; 7 – теж саме довготривалості горіння дуги;
 8 – теж саме кількості циклів; 9 – корпус токсознімача; 10 – зварювальний дріт;
 11 – корпус зварювальної горілки; 12 – мундштук; 13 – манжет; 14 – двигун; 15 – ролики;
 16 – барабан; 17 – анкер; 18 – метал зварного шва

Також товщина оболонки не повинна перевищувати половини діаметра анкера, тобто

$$\psi_1 \equiv -D \leq 0; \quad (2)$$

$$\psi_2 \equiv -t \leq 0; \quad (3)$$

$$\psi_3 \equiv t \leq 0,5 D. \quad (4)$$

Крім цього вимагається, щоб діаметр анкера не перевищував ширини плоскої частини нижньої полицки гофра $b_{l,r,pl}$. Для настилу Н75-750-0.9 ця величина дорівнює 38 мм:

$$b_{l,r,pl} = b_{l,r} - 2(R_r + t_a) = 38, \quad (5)$$

$b_{l,r}$ – ширина гофра по низу настилу; R_r – радіус згину листа по лінії вздовж гофра; t_a – товщина листа настилу;

$$\psi_4 \equiv D - b_{l,r,pl} \leq 0. \quad (6)$$

За умовами виконання автоматичного і напівавтоматичного зварювання товщина листа, який примикає до полицки таврового з'єднання, не може бути меншою за $t_w = 2$ мм, тобто

$$\psi_5 = t_w - t \leq 0. \quad (7)$$

За умовами габаритів зварювального обладнання зварювального пальника внутрішній діаметр анкера повинен бути не меншим D_w , що дорівнює 16 мм, тобто,

$$\psi_6 = D_w - (D - 2t) \leq 0. \quad (8)$$

Враховуючи обмеження (6)–(8), для цього проекту прийняті труби, діаметри і товщини яких становлять числові ряди:

$$\begin{aligned} D_{25} &= \{25, 2.0, 2.2, 2.5\}; & D_{34} &= \{34, 2.0, 2.2, 2.5, 2.8, 3.0\}; \\ D_{22} &= \{22, 2.0\}; & D_{32} &= \{32, 2.0, 2.2, 2.5, 2.8, 3.0\}; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} D_{28} &= \{28, 2.0, 2.2, 2.5\}; & D_{36} &= \{36, 2.0, 2.2, 2.5, 2.8, 3.0\}; \\ D_{30} &= \{30, 2.0, 2.2, 2.5\}; & D_{38} &= \{38, 2.0, 2.2, 2.5, 2.8, 3.0\}; \end{aligned}$$

У рядах (9) перший член означає діаметр, а наступні – товщини стінок труб, які є в сортаменті для цього діаметра, в мм.

Для того, щоб забезпечити міцність з'єднання за матеріалом анкера і бетону, напруження в них повинні бути менші за граничні. В математичному представленні це виражається так:

$$\psi_7 = \frac{1.57T_{an,1}}{\pi(D-t)} - R_{an,v} \leq 0, \quad (10)$$

де $T_{an,1}$ – зусилля зсуву, яке припадає на анкер; $R_{an,v}$ – опір матеріалу анкера на дію поздовжніх сил;

$$\psi_8 = \frac{T_{an,1}}{100D^2} - \sqrt{R_b} \leq 0, \quad D \leq 23,8 \text{ мм}, \quad (11)$$

де R_b – опір бетону на дію поздовжніх стискаючих сил,

$$\psi_9 = \frac{T_{an,1}}{24hD} - \sqrt{R_b} \leq 0, \quad D > 23,8 \text{ мм}. \quad (12)$$

Використана в (10) залежність, взята з [1, 5]. У практиці проектування США для визначення несучої здатності суцільних стрижнів, виготовлених з мало-вуглецевої сталі, і замоноличених у високоміцному бетоні використовується інша залежність [3]:

$$T_{an,1} = 0,63D^2 R_{an,v}. \quad (13)$$

Порівняння результатів, які отримані згідно з [1, 5] і [3] для бетону класу B15 і настилу Н80А-674-0,9, наведено в роботі [2]. Залежність, використана в (10), для анкерів діаметром 16 мм і вище дає достовірніші результати.

Залежності використані в (11)–(12), взяті з [3]. У [5] для розрахунку анкерів закладних деталей використовується альтернативна залежність

$$T_{an,1} = k_{an} Dh R_b. \quad (14)$$

У застосуванні для розрахунку анкерних в'язів залізобетонних плит з листовою гофрованою арматурою в роботі [2] коефіцієнт k_{an} визначається за такою формулою:

$$k_{an} = 1,6 - 1,4D + 0,7D^2, \quad k_{an} \leq 2 \quad (15)$$

Однак запропонований в [2] квадратний тричлен, дає задовільні результати тільки для діаметрів в границях 4–14 мм

$$\psi_{10} = \frac{1,7R_{b,t}A_{b,t}}{\pi t(D-t)} - R_{an,v} \leq 0, \quad (16)$$

де $R_{b,t}$ – опір розтягу бетону при дії осьових сил; $A_{b,t}$ – площа проєкції сколювання бетону на горизонтальну площину (рис. 3), обчислюється за формулою

$$A_{b,t} = 2h_s b_r - h_a (b_r - b_{l,r}). \quad (17)$$

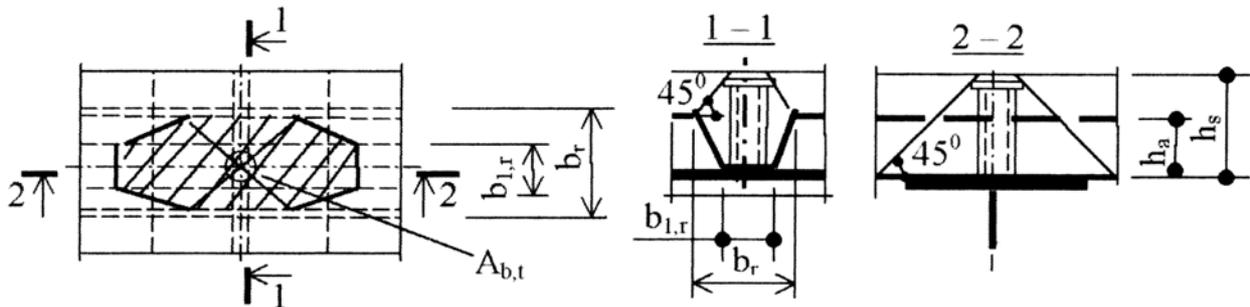


Рис. 3. Визначення проєкції тіла сколювання бетону при руйнуванні анкерних зв'язей

Необхідно також забезпечити міцність матеріалу листового армування

$$\varphi_{11} = \frac{T_{an,l}}{R_a(l_{an,ed} + \pi D)t_a} - R_a \leq 0, \quad (18)$$

де $l_{an,ed}$ – відстань від анкера на крайній опорі до кромки плити; R_a – опір листового армування на дію поздовжніх розтягуючих сил.

$$\psi_{12} = \frac{T_{an,1}}{A_a} - R_a \leq 0 \quad (19)$$

де A_a – площа листового армування, яка припадає на один анкер.

$$\psi_3 = \frac{T_{an,1}}{A_{an,w}} - R_{a,w} \leq 0, \quad (20)$$

де $A_{an,w}$ – розрахункова площа зварного шва в місці кріплення анкера; $R_{a,w}$ – опір розтягу матеріалу зварного шва при дії осьових сил.

Через обмеження (18), для настилу Н75-750-9,0, що має 8 анкерних зв'язків, величина $T_{an,1}$ не може перевищувати

$$T_{an,1} = \frac{A_a R_a}{8} \leq 3107. \quad (21)$$

Отже, задача з проектування анкера з мінімальною вагою зводиться до вибору змінних проектування D , t , що мінімізують вагу (1) та задовольняють обмеження у вигляді нерівностей (2)–(4), (6)–(8), (10)–(12), (16) і (18)–(20). При цьому задачу можна спростити, якщо нерівність (3) замінити нерівністю (7), нерівність (2) і (4) виразити однією нерівністю, підставивши вираз для D із (2) в (4)

$$\psi_2 \equiv t - 0,5D \leq 0, \quad (22)$$

а нерівності (16) і (18)–(20) задовольнити за рахунок параметрів оптимізації $A_{b,t}$, $l_{an,ed}$, $A_{an,w}$ і A_a при конструюванні плити.

Тоді дійсна задача нелінійного квадратичного програмування формується так. Знайти вектор $D = [D, t]$, який мінімізує функцію $\psi_0(D, t)$ при обмеженнях (22), (6)–(8) і (10)–(12). Значення $T_{an,1}$ обмежене міцністю настилу (21). В дійсному проекті це значення не може перевищувати 3107. Розв'язком задачі будуть значення D і t , вибрані із сортаменту матеріалів в послідовності D_{22} – D_{38} , і є найближчими до оптимізованих. Запишемо цільову функцію і обмеження у вигляді

$$\psi_0(D, t) = 0.247t(D - t),$$

$$t \geq 0.2, D \geq 2t, D - 2t \geq 1.6, D \geq 2.0, D \leq 3.8,$$

$$\frac{1553}{t(D - t)} \leq 2200,$$

$$\frac{31,07}{D^2} \leq 9,9; \quad D \leq 2,38; \quad \frac{12,95}{D} \leq 9,9; \quad D \geq 2,38;$$

Наведемо графічне зображення розв'язання цієї задачі (рис. 4).

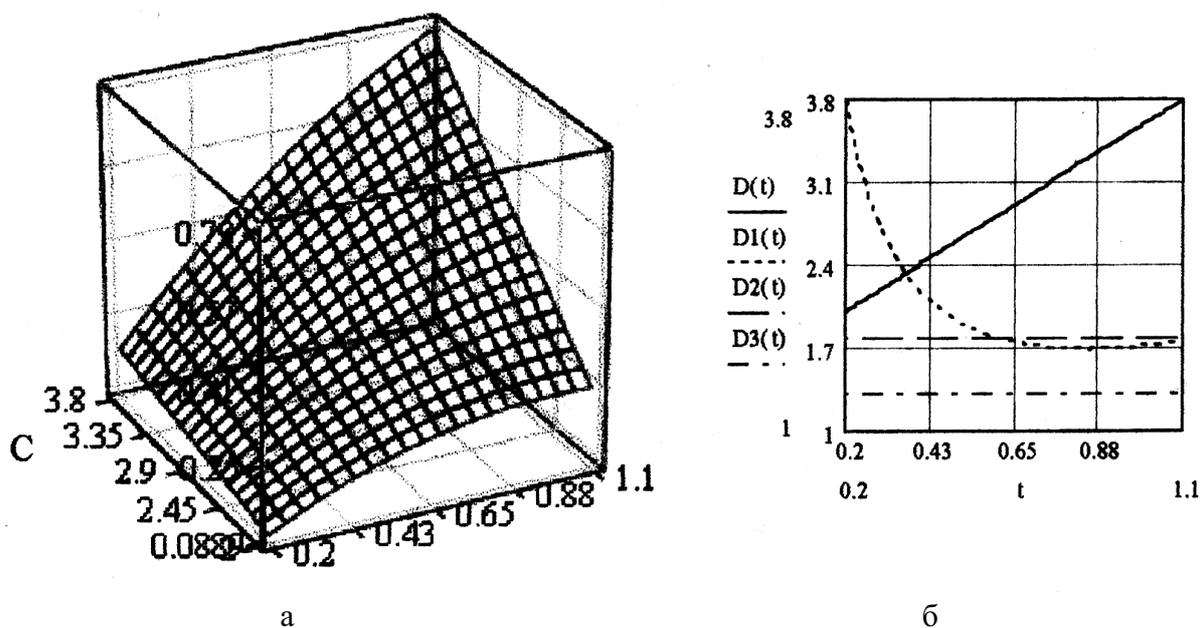


Рис. 4. Графік функції цілі і обмеження (22), (6)–(8) і (10)–(12):

a – поверхня зміни ваги анкера (цільова функція);

б – обмежена на площині $t - D$; $D(t) = 2t + 1,6$;

$D1(t) = t + 1553/2200t$; $D2(t) = 31,07/9,9^{1/2}$; $D3(t) = 12,95/9,9$

Очевидно, що область існування цільової функції обмежена прямими $D = 3,8$, $D(t)$ і кривою $D1(t)$. На всій області функція зростає так, що її абсолютний мінімум знаходиться в точці на перетині $D(t)$ і кривій $D1(t)$. Координати цієї точки $D = [2,32; 0,36]$. Площа перерізу і вага такого анкера відповідно дорівнює $2,217 \text{ см}^2$ і $0,174 \text{ кг}$. Анкер з площею перерізу близький за сортаментом до мінімізованого $D = [3,2; 0,25]$. Площа перерізу і вага такого анкера відповідно дорівнюють $2,317 \text{ см}^2$ і $0,182 \text{ кг}$.

По відношенню до традиційно використовуваних суцільних анкерів діаметром $2,5 \text{ см}$ ($4,909 \text{ см}^2$, $0,385 \text{ кг}$) мінімізований анкер забезпечує 52% економії матеріалу, який використо-

вугється безпосередньо на виготовлення анкера. В перекритті музею оборони в Севастополі [6] було встановлено 9 тис. анкерів з економією сталі 1800 кг. Але це лише невелика частина загального економічного ефекту, отриманого внаслідок зменшення витрат електричного струму при встановленні анкерів і пов'язаного з цим зменшення площі поперечного перерізу електричних кабелів і полегшення зварювального обладнання. Наведемо порівняльні характеристики режимів виконання зварювальних робіт при встановленні традиційних і мінімізованих анкерів (таблиця).

**Порівняльні характеристики режимів виконання зварювальних робіт
при встановленні традиційних і мінімізованих анкерів**

Технологія виконання зварювальних робіт	Зовнішній діаметр, см; вага, кг	Струм короткого замикання I, А	Джерела струму для зварювання	Площа поперечного перерізу кабелів, см ² , рекомендована максимальна довжина, м
Традиційна	2,5 0,385	2100	ВДУ 1601 ВДФ 2001 ТДФ 1601	1,5; 60
Модифікована з використанням мінімізованих анкерів	3,2 0,182	500	ВДУ 501-ВДУ 506 ВС 600 ВДГ 603	0,5; 150

1. *Руководство по проектированию железобетонных конструкций с жесткой арматурой / НИИЖБ Госстроя СССР, ЦНИИ промизданий Госстроя СССР. – М., 1978. – 64 с.* 2. *Монолитные перекрытия зданий и сооружений / И.В. Санников, В.А. Величко, С.В. Сломонов, Г.Е. Бимбад, М.Г. Томильцев. – К., 1991. – 152 с.* 3. *Стрелецкий Н.Н. Стале-железобетонные мосты. – М., 1965. – 166 с.* 4. *Санников И.В., Недашковская О.В. Новый тип соединения сварных конструкций // Развитие, совершенствование и реконструкция специальных сварных стальных конструкций зданий и сооружений: Тез. докл. Укр. республ. науч.-техн. конф. – К., 1988. – 18 с.* 5. *СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции. – М., 1989. – 80 с.* 6. *Санников И.В., Недашковская О.В. монолитная железобетонная плита, армированная профилированным настилом, в перекрытии музея обороны в Севастополе // Здания из монолитного железобетона: Сб. науч. тр. / Киев ЗНИИЭП. – К., 1989, – С. 39–84.*