

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МІЦНОСТІ

УДК 620.172.254:539.4

На правах рукопису

ВАЩЕНКО Олександр Петрович

ДЕФОРМУВАННЯ ТА РУЙНУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ
ЗА ВИСОКОШВИДКІСНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ $/10^2 \dots 10^5 \text{ с}^{-1}/$
І ТЕМПЕРАТУР 77 ... 773 К

05.02.09 - Динаміка, міцність машин,
приладів та апаратури



А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
дисертації на здобуття вченого ступеня
доктора технічних наук

КИЇВ 1995

Робота виконана в Інституті проблем міцності НАН України,
ЛННБ України ім.В.Стефаника

Науковий консультант: доктор
Г. А. Сос



00761580 (R)

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
А.М.Вєтров,
доктор технічних наук, професор
М.С.Ковальченко,
доктор технічних наук, професор
Б.І.Ковальчук.

Провідна організація: науково-дослідний інститут механіки
швидкоплинних процесів Міністерства
освіти України /м. Київ/.

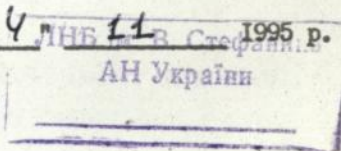
Захист відбудеться "14" 12 1995 р.
о 9 год. 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради
Д 01.99.01 при Інституті проблем міцності НАН України
у приміщенні конференц-залу Інституту за адресою:
252014, Київ-14, вул. Тімірязєвська, 2.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту
проблем міцності НАН України.

Автореферат розіслано "4" 12 1995 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради,

доктор технічних наук



О.О.Гігіняк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Створення нових зразків машин і механізмів, що зазнають в експлуатації дії імпульсних навантажень за різних температур, інтенсивний розвиток прогресивних технологічних процесів високошвидкісної обробки металів вимагають знання поведінки конструкційних матеріалів у широкому діапазоні температурно-швидкісних умов деформування.

Важливість динамічних випробувань матеріалів визначається отриманням механічних характеристик, необхідних для розрахунків на міцність, а також тим, що результати таких досліджень є основою для побудови моделі матеріалу і встановлення його рівняння стану $\sigma = f(\epsilon, \dot{\epsilon}, T)$, що враховує чутливість матеріалів до швидкості деформації $\dot{\epsilon}$ за різних температур T , і придатного для інженерних розрахунків з метою раціонального проектування об'єктів нової техніки і технології.

Для проведення таких експериментів потрібне спеціальне випробувальне обладнання, котре промисловістю не випускається. Відсутність стандартів з визначення характеристик динамічної міцності і пластичності конструкційних матеріалів призвела до значної різноманітності методів ударних випробувань, які мають ряд принципових відмінностей, що утруднюють аналіз і узагальнення накопичених результатів.

Раніше встановлено істотний вплив швидкості деформації на поведінку конструкційних матеріалів, що викликає підвищення характеристик міцності із зростанням швидкості, однак до цього часу немає єдиної думки стосовно зміни пластичних властивостей металів із підвищенням швидкості деформації. До того ж наявні в літературі дані щодо механічних властивостей конструкційних матеріалів навіть за умов кімнатної температури в більшості обме-

жені величинами швидкостей деформації порядку $10^2 \dots 10^3 \text{ с}^{-1}$. Стосовно опільного впливу на них швидкості деформації та температури, то за швидкості більшої 10^3 с^{-1} , за винятком поодиноких результатів з границі текучості, на час початку даної роботи такої інформації практично не було. Це зумовлено труднощами, пов'язаними з короткочасністю процесу випробування і наявністю хвилювих процесів у зразку та елементах систем навантаження і реєстрації.

Недостатній розвиток експериментальних досліджень конструкційних матеріалів за високих швидкостей деформування визначає актуальність вивчення поведінки металевих, полімерних і композитних матеріалів під дією динамічних навантажень у широкому діапазоні температур як одного з розділів механіки твердого тіла, що деформується.

Мета даної роботи полягає у встановленні закономірностей зміни опору матеріалів деформуванню і руйнуванню в діапазонах швидкостей деформації $10^2 \dots 10^5 \text{ с}^{-1}$ і температур $77 \dots 773 \text{ К}$.

В межах поставленої мети в роботі сформульовані наступні основні завдання:

- розробка науково обґрунтованих методів механічних випробувань конструкційних матеріалів за різних видів високошвидкісного деформування, що забезпечують отримання вірогідних кількісних результатів;

- створення нового випробувального обладнання, яке порівняно з відомим на 1 ... 2 порядки розширить діапазон реалізовуваних швидкостей деформації (приблизно до $5 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$) з реєстрацією повних діаграм зусилля-час;

- експериментальне дослідження механічних властивостей конструкційних матеріалів і встановлення основних закономірностей

зміни опору матеріалів деформуванню та руйнуванню у широкому діапазоні температурно-швидкісних умов навантаження.

Наукова новизна роботи:

- розроблено оригінальні методи механічних випробувань конструкційних матеріалів за різних видів високошвидкісного навантаження /розтягання, стискання, стискання із зсувом, входження конічного бойка в перешкоду, зріз/, та випробувальне обладнання, включаючи вертикальні копри з падаючим вантажем і пневмопороховий копер для проведення випробувань із швидкостями деформування до 1000 м/с;

- розроблено для швидкостей деформації $10^{-3} \dots 10^4 \text{ с}^{-1}$ і температур 77 ... 773 К метод механічних випробувань матеріалів на розтягання з використанням ідентичних циліндричних зразків із скороченою робочою частиною, зв'язаних нарізним з'єднанням із стаціонарним трубчастим динамометром;

- встановлено, що у випробуваннях на одновісне розтягання гранично досяжна швидкість пластичної деформації складає величину, рівну приблизно $5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$;

- за результатами випробувань на розтягання отримані дані про спільний вплив швидкостей деформації $10^{-3} \dots 10^4 \text{ с}^{-1}$ і температур 77 ... 773 К на механічні властивості ряду конструкційних матеріалів, що засвідчують залежність чутливості матеріалів до швидкості деформації від конкретних температурно-швидкісних умов деформування;

- встановлено відсутність еквівалентності впливу на механічні властивості металів зниження температури /до 77 К/ і підвищення швидкості деформації /до 10^4 с^{-1} /, яка свідчить, що за низьких температур визначальний вплив на перехід металів із в'язкого стану до крихкого справляє не швидкість деформації, а напружено-де-

формований стан в зоні руйнування тіла, що деформується;

- встановлено, що поведінка металів залежно від швидкості деформації і температури якісно описується схемою механічного стану, аналогічною схемі О.Ф.Іоффе.

Практична цінність роботи полягає в наступному:

- на підставі розроблених методів механічних випробувань конструкційних матеріалів за різних видів високошвидкісного навантаження створено нове випробувальне обладнання, яке порівняно з відомим на I ... 2 порядки розширює діапазон реалізовуваних швидкостей деформації та дозволяє отримувати повні діаграми зусилля-час за швидкостей аж до $5 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$;

- отримано великий обсяг нових співставних експериментальних даних щодо характеристик міцності та пластичності металевих, полімерних і композитних матеріалів у широкому діапазоні температурно-швидкісних умов деформування, які можуть бути використані у розрахунках на міцність елементів конструкцій, що зазнають впливу імпульсних навантажень, та для вибору оптимальних технологічних параметрів високошвидкісних процесів обробки матеріалів;

- на підставі узагальнення отриманих експериментальних даних розроблено аналітичні залежності опору маловуглецевих сталей деформуванню від ступеня та швидкості деформації, а також від температури, використання яких стосовно до процесів тонколистової прокатки металів /уточнені розрахунки тиску металу на валки, вибір раціональних величин обтискання/ дозволило підвищити продуктивність станів холодної прокатки;

- методичні розробки і результати досліджень використані в зацікавлених науково-дослідних установах і підприємствах для оцінки міцності матеріалів та конструкцій, що зазнають дії імпульсних навантажень, і оптимізації технологічних процесів висо-

ковшадкісної металообробки із сумарним річним економічним ефектом від запровадження в один мільйон карбованців за курсом 1990 р.

Апробація роботи. Основні результати роботи було представлено на 11 Конгресі з випробувань матеріалів "Євромат 94" /Будапешт, Угорщина, 1994/, міжнародній конференції "Механічна та фізична поведінка матеріалів за динамічного навантаження Євродимат 94" /Оксфорд, Англія, 1994/, 7 та 8 міжнародних конференціях "Рівняння стану" /Ельбрус, Росія, 1990 і 1992/, міжнародній конференції "Зародження та зростання тріщин у металах і кераміці - роль структури та оточуючого середовища" /Варна, Болгарія, 1991/, міжнародній конференції з виміральної техніки та приладобудування /ІМБКО/ "Випробувальне обладнання для експериментальних досліджень механічних властивостей матеріалів і конструкцій" /Москва, СРСР, 1989/, III та IV Всесоюзних симпозіумах "Міцність матеріалів і елементів конструкцій за складного напруженого стану" /Житомир, 1989; Севастополь, 1992/, II та III Всесоюзних конференціях "Міцність матеріалів та конструкцій за низьких температур" /Київ, 1986; Вінниця, 1991/, I, II і III Республіканських семінарах "Динамічна міцність та тріщиностійкість конструкційних матеріалів за одноразового імпульсного навантаження" /Київ, 1985, 1988 і 1991/, 9 зимовій школі з механіки суцільних середовищ /Перм, Росія, 1991/, науково-технічній конференції "Прогресивні процеси обробки матеріалів тиском" /Гомель, Білорусь, 1989/, 5 Всесоюзній конференції "Отримання і обробка матеріалів високим тиском" /Мінськ, 1987/, науково-технічній конференції "Прогресивні полімерні матеріали, технологія їх переробки та застосування" /Азов, 1988/, II Всесоюзній нараді з детонації /Чорногловка, 1981/, II та III Всесоюзних симпозіумах з імпульсних тисків /Москва, 1976 та 1979/, на наукових семінарах

Інституту проблем міцності НАН України, Інституту механіки МДУ ім. М.В.Ломоносова, науково-дослідного центру теплофізики імпульсних впливів Об'єднаного інституту високих температур Російської академії наук, Центрального науково-дослідного інституту хімії та механіки /Москва, Росія/, Московського Державного технічного університету ім. М.Е.Баумана, Московського інженерно-фізичного інституту, науково-дослідного інституту проблем механіки "Ритм" /Київ, Україна/, науково-дослідного інституту механіки швидкоплинних процесів Міністерства освіти України /Київ/.

Публікації. Матеріали дисертації надруковано у п'ятдесяти наукових статтях та трьох препринтах. За результатами виконаних методичних розробок отримано дев'ять авторських свідоцтв на винаходи.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, п'яти глав, висновку, списку використаних джерел та додатку з даними про технічне запровадження. Робота складається із 197 сторінок машинописного тексту, 114 рисунків, 12 таблиць та списку використаних джерел із 323 найменувань.

Особистий внесок автора дисертації у розв'язанні поставленої наукової проблеми, яке виноситься на захист, полягає у розробці науково обгрунтованих методів високошвидкісних механічних випробувань конструкційних матеріалів, створенні нового випробувального обладнання, експериментальному дослідженні механічних властивостей конструкційних матеріалів та встановленні основних закономірностей зміни опору матеріалів деформуванню та руйнуванню у широкому діапазоні температурно-швидкісних умов навантаження.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі дається короткий аналіз стану проблеми, що розглядається в дисертації, відзначено її актуальність, сформульовано основні наукові засади, які виносяться на захист, відзначено наукову новизну та практичну значущість результатів проведеної роботи.

В першій главі зроблено аналіз сучасного стану питання вивчення механічних властивостей конструкційних матеріалів за високошвидкісного деформування у широкому діапазоні температур. Головну увагу приділено методичним аспектам проведення динамічних випробувань та аналізу відомих результатів досліджень впливу високих швидкостей деформації $/10^2 \text{ с}^{-1}$ та більше/, високих і низьких температур на міцність і пластичність конструкційних матеріалів.

Динамічні випробування по діапазонах швидкостей деформації $\dot{\epsilon}$ поділяють на швидкісні $/\dot{\epsilon} = 10^{-1} \dots 10^1 \text{ с}^{-1}/$ і високошвидкісні $/\dot{\epsilon} = 10^2 \dots 10^5 \text{ с}^{-1}/$. Випробування в умовах високошвидкісного деформування відзначаються найбільшою складністю і вимагають використання спеціального обладнання і спеціальних методів дослідження.

Великий внесок у розвиток методів динамічних випробувань зробили вчені колишнього СРСР М.М. Давиденков, Ф.Ф. Вітман, Р.О. Васін, В.Я. Волошенко-Климовичський, М.А. Златін, Г.І. Канель, В.С. Ленський, С.О. Новіков, Л.П. Орленко, В.Г. Петушков, Г.В. Степанов та ін., зарубіжні вчені батько і син Голкінсони, Л. Дарфі, Р. Девіс, Д. Кларк, Я. Клепачко, Г. Кольський, Дж. Кемпбелл, У. Міндхольм, М. Менджоін, М. Мейерс, А. Надаї, Т. Ніколас, Дж. Тейлор, Дж. Хардінг, Ф. Хаузер та ін.

За динамічних випробувань вплив швидкості деформації на міцність і пластичність матеріалів слід визначати за результатами так званих квазістатичних випробувань, за яких напружений і деформований стани у робочій частині зразка можуть бути прийняті однорідними. Короткочасність динамічних випробувань вимагає врахування хвильових процесів та інерційних ефектів у зразку та елементах ланцюга навантаження і реєстрації, а співставність отримуваних результатів вимагає забезпечення в досліджуваному швидкісному діапазоні визначеного параметру випробування.

Великого поширення у практиці динамічних випробувань набуло устаткування з гідравлічними, пневматичними і магнітоімпульсними перетворювачами; маятникові, ротаційні та вертикальні копри; балістичне устаткування. Відзначено, що найширше, особливо в зарубіжжі, у високошвидкісних випробуваннях поширений метод розрізного стержня Голкінсона. Внаслідок того, що випробування на одновісне розтягання, що забезпечують отримання найповнішої інформації щодо механічних властивостей матеріалів, методично є одним із найскладніших, великого поширення набули високошвидкісні випробування на стискання, кручення, зріз, що дозволяють, однак, надійно визначати опір матеріалів деформуванню тільки в області малих значень деформації /границя текучості/.

З аналізу досить великої кількості накопичених експериментальних результатів, що підлягають певній систематизації, вживає, що за кімнатної температури найінтенсивніше зростання опору матеріалів деформуванню має місце за швидкостей деформації більших від 10^3 с^{-1} . Однак до середини 70-х років / на момент початку даних досліджень / навіть в умовах кімнатної температури було дуже мало вірогідних результатів механічних випробувань із швидкостями деформації порядку 10^3 с^{-1} і більше. Нестача відомостей

про поведінку матеріалів за високошвидкісного деформування був наслідком відсутності надійних експериментальних методів і відповідного устаткування для високошвидкісних випробувань конструкційних матеріалів у широкому діапазоні температур.

На підставі проведеного аналізу порушеної в дисертації проблеми, який свідчить про актуальність досліджень із встановлення закономірностей зміни опору матеріалів деформуванню та руйнуванню за високошвидкісного навантаження у широкому діапазоні температур, сформульовано мету і основні завдання роботи.

Другу главу присвячено викладові розробленого методу дослідження механічних властивостей матеріалів за високошвидкісного одновісного розтягання у діапазоні температур 77 ... 773 К.

Необхідною умовою отримання за різних швидкостей деформування вірогідних і співставних результатів є забезпечення у процесі експерименту визначеного параметру випробування, найдосяжнішим із яких у широкому діапазоні швидкостей розтягання, починаючи від статичних, є параметр $\dot{\epsilon} = \text{const}$, обраний для проведення цих досліджень.

Згідно із прийнятою схемою випробувань, аналогічною розробленій раніше В.Г.Петушковым /рис. 1/, експерименти здійснюються ударом бойка кільцевого перерізу 2 по ковадлу 5, рух якої разом з головкою зразка 4 призводить до його деформації і руйнування. При цьому зразкові задається постійна швидкість прирощення абсолютного подовження – швидкість деформування V , оскільки кінетична енергія бойка багаторазово перевищує втрати на удар і руйнування зразка. Діаграму деформування зразків реєстрували за допомогою наклеєних на пружному динамометрі 1 дротових, фольгових або напівпровідникових тензорезисторів 3, динамічне градування котрих підтвердило дані про практичну рівність статичного і ди-

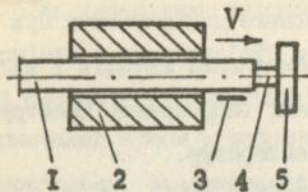


Рис. 1. Схема випробувань на розтягання: 1 - динамометр; 2 - боек; 3 - тензорезистор; 4 - зразок; 5 - ковадло.

намічного коефіцієнтів тензоочутливості. За умов кімнатної температури для вимірювання поперечних деформацій динамометра використовувались також і розроблені емкісні тензодатчики, сигнал з яких приблизно на два порядки перевищує сигнал з тензорезисторів.

Характеристики пластичності матеріалів δ , Ψ визначалися на підставі безпосередніх вимірювань відповідних розмірів зразків до і після випробування.

Прийняту схему високошвидкісних випробувань на розтягання реалізовано в розроблених Інститутом проблем міцності НАН України вертикальних з падаючим вантажем і пневмопороховому копрах, що забезпечують у всьому швидкісному діапазоні 2 мм/хв ... 300 м/с єдиний закон деформування $\dot{\epsilon} = \text{const}$. Відзначимо, що для нагрівання зразків в устаткуванні використовували електричні печі опору, а для охолодження - рідкий азот.

Рівномірна деформація по довжині робочої частини зразка у процесі випробувань і неперекручена реєстрація напружень і деформацій - головні умови отримання вірогідних даних про механічну поведінку матеріалу під навантаженням. Їх виконання не викликає труднощів за малих швидкостей деформування, однак вимагає розробки спеціальної методики випробувань, що враховує хвильові явища і неоднорівність напруженого стану у зразку і динамометрі, за високих швидкостей деформування.

Дотримання постійної швидкості деформації $\dot{\epsilon}$ за умови зберігання рівномірності деформування по довжині робочої частини зразка потребує для високошвидкісних випробувань обмеження її

розмірів / довжини l_0 і діаметра d_0 / і часу нарощення швидкості руху навантажуваного кінця зразка до номінальної відповідними умовами, отриманими Г.В. Степановим, що засвідчують необхідність зменшення розмірів робочої частини зразка з метою збільшення реалізовуваної в ній швидкості пластичної деформації. При цьому, згідно із розрахунком зразків із вкороченою робочою частиною, проведеному чисельно методом кінцевих елементів М.М. Астаховим і ін., встановлено, що зони неоднорізного напруженого стану у головок складають по осі робочої частини зразків 0,56 діаметра останньої. Отже, у зразках із співвідношенням $l_0 / d_0 < 1,12$ область однорізного напруженого стану відсутня, а наявність тривісного напруженого стану призводить у таких зразках до завищених результатів.

Відсутність до нинішнього часу стандартів на проведення високошвидкісних випробувань на розтягання вимагала виконання спеціальних досліджень впливу типу і розмірів зразків та динамометрів на діаграму деформування матеріалу, що реєструється у експериментах. Випробовували циліндричні зразки з нарізними головками /рис. 2, а/, з'єднані із стаціонарним стержнем-динамометром, і зразки, робоча частина яких виконана заодно з динамометром /рис. 2, б/, а також заодно з динамометром і ковадлом /рис. 2, в/. У якості динамометра використовували трубку із сталі ІХІВН9Т діаметром 14 мм і товщиною стінки 3 мм /кінець трубки обтискали до внутрішнього діаметра 6,9 мм під різьбу М8 крок 1 для з'єднання із зразком / і прутком із сталі УВ діаметром 15 мм з виточкою під нарізну головку зразка.

Аналіз експериментальних результатів показав, що в області швидкостей розтягання більше від 100 м/с $\dot{\epsilon} > 10^4 \text{ с}^{-1}$ / необхідне використання динамометрів мінімального поперечного перері-

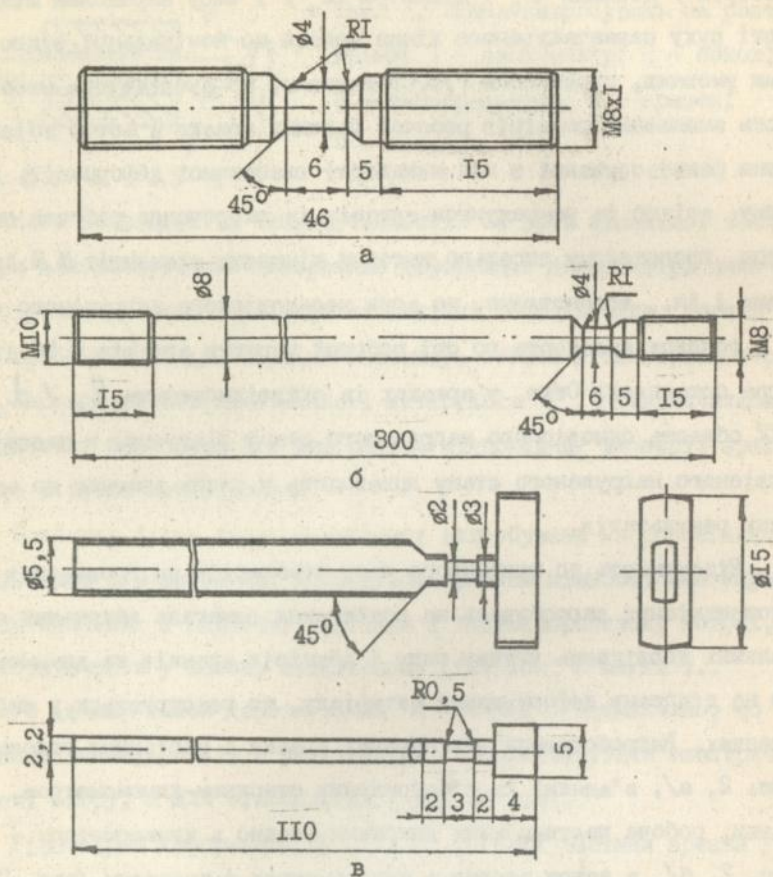


Рис. 2. Зразки для випробувань на розтягання.

зу, достатнього для усунення в них пластичних деформацій, і виготовлених з одної заготовки як одне ціле із зразком /рис. 2, б, в/. Зменшення діаметрів зразка і діаметра - одна із основних умов вірогідної реєстрації діаграми розтягання матеріалів є високими швидкостями. Тому діаграми зусилля-час, отримані з використанням цих зразків /рис. 2, б, в/, і практично позбавлені будь-яких викривлень, можна було прийняти як еталонні.

Встановлено, що випробування на одновісне розтягання обмежені величиною досяжної швидкості пластичної деформації порядку $5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$. При цьому отримання за таких граничних швидкостей деформації цілком вірогідних діаграм зусилля-час можливе тільки за допомогою зразків, робоча частина котрих виконана заодно з динамометром і ковадлом /рис. 2, в/. Однак використання зразків, показаних на рис. 2, б і в, виключає, з причини значної довжини, можливість випробувань матеріалів, що мають обмежені розміри, наприклад, листових матеріалів у напрямі товщини. Такі зразки трудомісткі у виготовленні, а використання у кожному досліді індивідуальних динамометрів і тензорезисторів збільшує розкид результатів випробувань.

Дослідження, проведені за допомогою стаціонарних динамометрів і зразків з нарізними головками /рис. 2, а/, показали, що ступінчаста зміна швидкості поперечного перерізу динамометра з прутка в області закінчення нарізного отвору під зразок викликає осциляції напружень, що викривляють діаграму розтягання і призводять до помилкових результатів. А у випадку нарізного з'єднання циліндричних зразків із трубчастим динамометром в області швидкостей розтягання до 100 м/с / $\dot{\epsilon} \leq 10^4 \text{ с}^{-1}$ / зареєстровано діаграми зусилля-час, подібні до еталонних, і отримано практично тотожні еталонним результати, що значно полегшує проведення експериментальних досліджень та підвищує їх продуктивність, забезпечуючи при цьому вірогідність отримуваних даних.

Універсальні стаціонарні трубчасті динамометри, що використовувались для проведення механічних випробувань на вертикальних і пневмопороховому копрах у діапазоні швидкостей розтягання від 2 мм/хв до 100 м/с , тарували на гвинтовому навантажувачому пристрої за допомогою зразкового динамометра з індикатором типу

ДОСМ-3 та цифрового вимірювача деформацій типу ІДД-І.

Для реєстрації діаграми деформування зразка у випробуваннях використовують поздовжню деформацію динамометра, а наявність у ньому радіальних, поздовжніх і згинальних коливань обумовлює похибки у визначенні зусилля.

Внаслідок радіальної інерції напружений стан трубчастого динамометра значно відхиляється від лінійного до плоского. При цьому реєстрована тензорезисторами поздовжня деформація залежить не тільки від зусилля у зразку, але і від напружено-деформованого стану динамометра, що змінюється у процесі радіальних коливань з частотою $f = c / \pi \cdot D_{\text{сер}}$, де c - швидкість звуку в матеріалі динамометра, $D_{\text{сер}}$ - середній діаметр динамометра. Аналіз деформації тензорезистора трубчастого динамометра засвідчив, що за його розміщення під кутом $\beta = \alpha \cdot \text{tg} \sqrt{\mu}$ до осі динамометра / μ - коефіцієнт Пуасона матеріалу динамометра / забезпечується незалежність деформації тензорезистора від радіальних коливань динамометра, а сигнал, що реєструється, є пропорційним зусиллю, яке діє у зразку у випробуванні, і не викривлюється радіальними коливаннями.

Для усунення накладання на отримуваний сигнал поздовжніх коливань динамометра його довжину L вибирали за умовою $L > t_B \cdot c / 2$, де t_B - тривалість випробування зразка, тобто час пробігу пружних хвиль подвоєної довжини динамометра має перевищувати тривалість досліджуваного процесу. За швидкостей розтягання менших від 2 м/с використовують динамометр мінімальної довжини /30 мм/, обмеженої конструктивними міркуваннями. Внаслідок того, що за малих швидкостей тривалість випробування на кілька порядків перевищує період поздовжніх коливань динамометра, останні практично не викривлюють реєстровану діаграму зусилля-час.

З метою врахування згинальних компонент імпульса тензорезистори, що використовуються для експериментальних досліджень /наприклад, типу ПНБ-5-100/, мінімум по два /або по чотири/ за технологією заводу-виготівника наклеювали на діаметрально протилежні поверхні одного й того ж перерізу динамометра, розташованого на відстані 2,5 діаметрів від його навантажуваного кінця, з'єднували послідовно і вмикали в одне з плечей мосту постійного струму нормуючого тензопідсилювача.

Масштаб реєстрованої діаграми визначали за величинєю зміни, що викликалися вмиканням паралельно тензорезисторам відомого калібрувального опору. При цьому величину калібрувального опору вибирали за умовою, щоб викликаний ним розбаланс мосту приблизно дорівнював розбалансу від пружного деформування динамометра в процесі експерименту.

Для аналізу напружень і деформацій в пружнопластичній області застосовували ступінну апроксимацію діаграми деформування $\sigma_i - \epsilon_i$ в дійсних координатах. За високошвидкісного розтягання оцінку деформаційного зміцнення металів проводили згідно із залежністю

$$\sigma_i = \beta \cdot \sigma_{0,2}^n \epsilon_i^n \quad /1/$$

де σ_i , ϵ_i - відповідно інтенсивності напружень і деформацій;
 β , n - показники ступеня деформаційного зміцнення матеріалу;
 $\sigma_{0,2}^n$ - умовна границя текучості матеріалу за відповідної швидкості деформації $\dot{\epsilon}$.

Пропонується модифікований метод визначення показників ступеня деформаційного зміцнення по двох точках діаграми високошвидкісного розтягання матеріалу: при досягненні умовної границі текучості та при руйнуванні зразка, ґрунтується на експериментально підтвердженій лінійності дійсної діаграми розтягання

$\sigma_i - \varepsilon_i$ у логарифмічних координатах як за статичного, так і за динамічного навантажуваннях.

Розроблений метод та створені експериментальні установки дозволили в умовах як низьких, так і високих температур на I ... 2 порядки підняти діапазон реалізовуваних швидкостей деформації /порівняно з відомими із літератури швидкостями/ і отримати вірогідні діаграми деформування при розтяганні з гранично досяжними швидкостями пластичної деформації. Числовий аналіз розробленого автором методу, проведений Г.В. Степановим та В.В. Харченком, підтвердив можливість отримання вірогідних результатів у діапазоні швидкостей деформації $\dot{\varepsilon}$ до $5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ за дотримання обмежень на розміри зразка і динамометра.

У третій главі наведено результати механічних випробувань конструкційних матеріалів на розтягання із швидкостями деформування до 300 м/с, що відповідають швидкостям деформації до 10^5 с^{-1} в умовах кімнатної температури.

За ідентичних умов випробували не менше 3 ... 5 зразків. Розрахункова похибка характеристик міцності складала 5 % за швидкостей навантажування до 100 м/с і не перевищувала 10 % при більших швидкостях, а розрахункова похибка характеристик пластичності не перевищувала 3 %. Середню швидкість деформації на ділянці пружного деформування визначали за тривалістю зростання навантаження від нуля до початку пластичної течії зразка, а середню швидкість пластичної деформації - за тривалістю t експериментальної діаграми на пластичній ділянці та величиною відносного подовження зразка δ , $\dot{\varepsilon} = \delta / t$. Статичні випробування з використанням зразків, показаних на рис. 2, а, провадили на машині "Інстрон" з електромеханічним записом діаграми зусилля-час.

На підставі багаточисельних нових експериментальних даних,

отриманих за єдиною методикою механічних випробувань на розтягання у діапазоні швидкостей деформації $10^{-4} \dots 5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, доведено відзначає для металів низкою вчених /М. Мендзоін, Дж. Хардінг, У. Ліндхольм, В. Г. Петушков/ і раніше, що із зростанням швидкості деформації підвищується як міцність, так і пластичність сталей різноманітних структурних класів, алюмінієвих та титанових сплавів, особливо за швидкостей, більших 10^3 с^{-1} /як ілюстрація наведено дані для хромонікельмолибденової сталі, рис. 3/. Мікрофрактографічний аналіз зламів зразків з досліджуваних сталей показав, що і в статичному режимі, і за максимально досягнутої в експериментах швидкості пластичної деформації руйнування відбувається по в'язкому механізму з утворенням характерного чашечного зламу, що вказує на високу енергомісткість руйнування. Встановлено негативний вплив сірки на механічні властивості сталі за високошвидкісного деформування.

Отримані результати відповідають сучасній дислокаційній моделі пластичної течії металів, згідно з якою рух дислокацій в залежності від швидкостей деформації контролюється двома різними механізмами гальмування: термофлуктуаційним / $\dot{\epsilon}$ до $10^3 \dots 10^4 \text{ с}^{-1}$ / та в'язким - за більших швидкостей, де опір матеріалів деформуванню зростає найінтенсивніше.

На відміну від металів підвищення міцності полімерних і композитних матеріалів з підвищенням швидкості деформації супроводжується збільшенням їх крихкості. Це пояснюється тим, що час, необхідний для релаксаційних процесів при течії полімерів, є на порядок більшим, ніж час переміщення дислокацій у металах, і, отже, при збільшенні швидкості в них не встигають відбутися структурні зміни.

Немає різного рівня статичної міцності встановлено нег-

В. Стефаніка
АН України

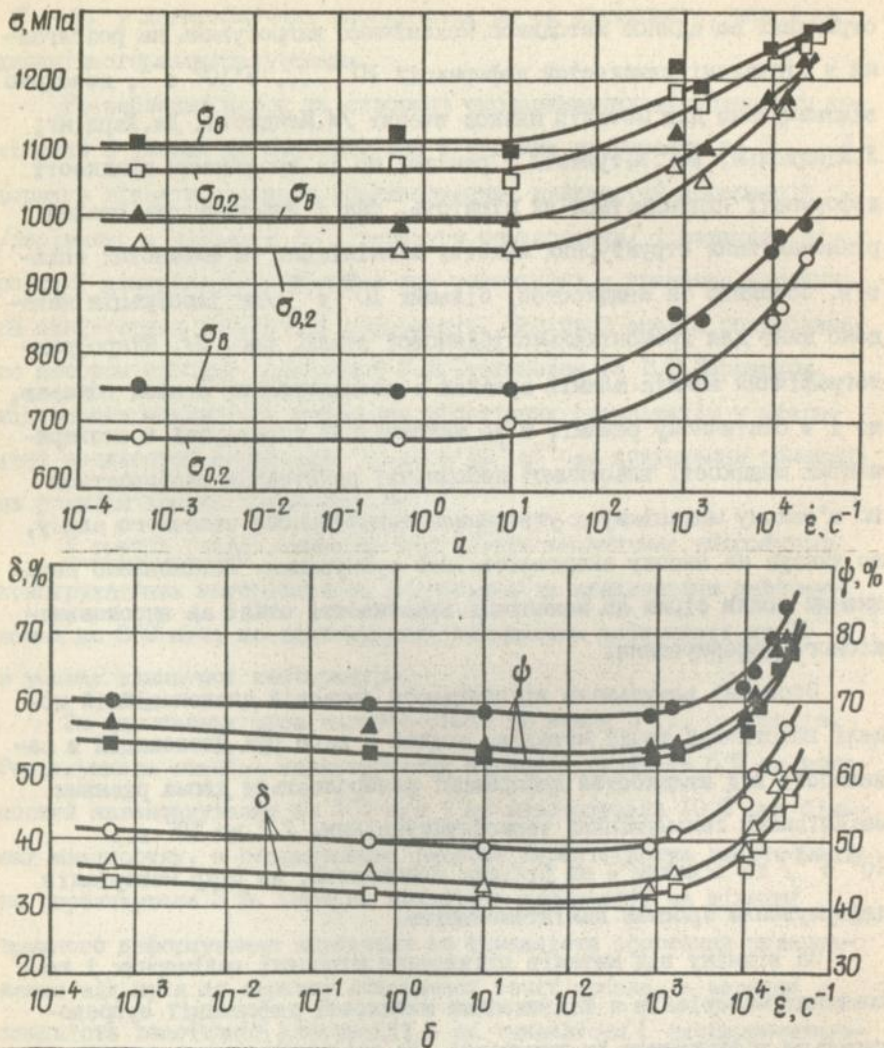


Рис. 3. Залежність характеристик міцності /а/ та пластичності /б/ хромонікельмолібденової сталі, термообробленої на різний рівень міцності, від швидкості деформації: ●, ○ - умовне позначення сталь Б; ▲, △ - умовне позначення сталь В; ■, □ - умовне позначення сталь Г.

тотний вплив швидкості деформації в досліджуваному діапазоні на коефіцієнт концентрації напружень.

Результати цієї роботи відповідають встановленим раніше основним закономірностям поведінки матеріалів при ударному навантаженні в умовах кімнатної температури, що свідчить про вірогідність розробленого методу високошвидкісних механічних випробувань на розтягання. Експериментально показано, що чутливість металів до швидкості деформації залежить від будови кристалічної решітки, особливостей їх структурного стану та щільності дислокацій у структурних складових. При цьому леговані сталі, висока міцність яких у вихідному стані досягається за рахунок формування складної структури внаслідок процесів вторинного твердіння, виявляються менш чутливими до швидкості деформації, ніж менш міцні сталі з простішою структурою.

Отримано, що з підвищенням рівня статичної міцності металів їх чутливість до швидкості деформації змінюється в бік вищих значень останньої. Так, армо-залізо, маловуглецеві та низьколеговані конструкційні сталі мають найвищу чутливість до швидкості. Сталі із статичною границею текучості приблизно від 500 до 1200 МПа практично нечутливі до швидкостей деформації до 10 с^{-1} . Збільшення швидкості деформації до 10^3 с^{-1} не справляє помітного впливу на механічні властивості високоміцних сталей. Досліджені алюмінієві сплави залежно від рівня міцності за статичного розтягання нечутливі до швидкостей $10^3 \dots 5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$. Така класифікація металів за їх чутливістю до швидкостей деформації дозволяє в інженерній практиці використовувати для розрахунків елементів конструкцій на міцність у відповідних умовах експлуатації за динамічних навантажень стандартні статичні механічні характеристики. Встановлено, що із збільшенням швидкості дефор-

мації ділянка деформаційного зміцнення на діаграмах деформування металів зменшується, а за швидкостей деформації порядку 10^4 с^{-1} практично має місце збігання динамічних границь текучості та міцності. Це дозволяє розрахунки на міцність конструкцій, що зазнають в експлуатації ударних навантажень із швидкостями деформації 10^4 с^{-1} і більше, вести із використанням методів теорії пружності.

Четверту главу присвячено результатам досліджень механічних властивостей поліамідів, сталей, алюмінієвих і титанових сплавів при розтяганні у діапазонах швидкостей деформації $10^{-3} \dots 10^4 \text{ с}^{-1}$ і температур 77 ... 773 К.

У якості модельних матеріалів було обрано армо-залізо і алюмінієвий сплав ДІ6, широко досліджені раніше, що дозволило проводити порівняльний аналіз отриманих експериментальних даних, які свідчать про залежність чутливості матеріалів до швидкості деформації від конкретних температурно-швидкісних умов деформування. Загалом, із підвищенням температури випробування до 573 ... 773 К чутливість характеристик міцності армо-заліза та маловуглецевих сталей до швидкості деформації зникає, а чутливість сплаву ДІ6 - збільшується. При цьому пластичність досліджених металів із збільшенням швидкості деформації зростає. За літературними даними, така поведінка властива металам відповідно з ОЦК і ГЦК решітками.

Результати досліджень спільного впливу високошвидкісної деформації та підвищених температур на механічні властивості чотирьох найпоширеніших для виробництва жерсті і автолиста маловуглецевих сталей по верхній границі текучості добре корелюють з даними, отриманими іншими авторами при динамічному стисканні на кулачковому пластометрі та на установці з розрізним стержнем Голжінсона.

На підставі отриманих експериментальних даних і методу термомеханічних коефіцієнтів стосовно процесів тонколистової прокатки розроблені аналітичні залежності опору маловуглецевих сталей деформуванню від ступеня і швидкості деформації, а також від температури.

Оскільки залежність $\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$ мультиплікативна і її можна розглядати як добуток функцій, кожна з котрих відображає внесок в процес деформування окремих факторів:

$$\sigma = f_1(\varepsilon) \cdot f_2(\dot{\varepsilon}) \cdot f_3(T) \quad /2/$$

для знайдення аналітичної залежності функції $\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$ використано метод Брандона, що дозволяє знайти коефіцієнти рівняння множинної регресії за частинними залежностями:

$$K_\varepsilon = f_1(\varepsilon) \quad , \quad K_{\dot{\varepsilon}} = f_2(\dot{\varepsilon}) \quad \text{і} \quad K_T = f_3(T) \quad /3/$$

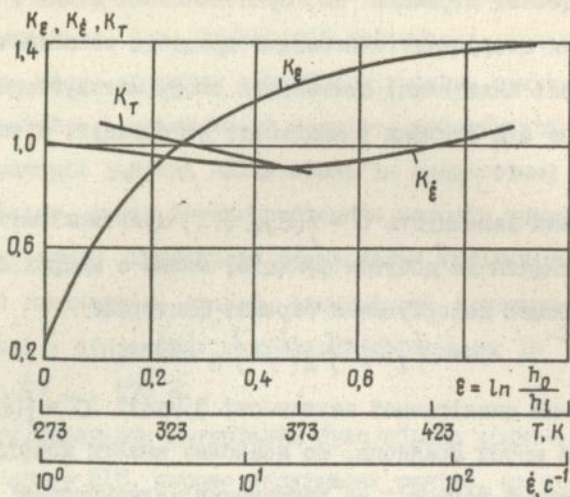
Аналіз частинних залежностей досліджених марок сталей показав, що закон зміни відповідних функцій від параметрів деформування є близьким для всіх марок сталей. На цій підставі визначені середні частинні залежності термомеханічних параметрів для цієї групи сталей /рис. 4/. Оскільки залежність $K_{\dot{\varepsilon}} = f_2(\dot{\varepsilon})$ має складний характер, для наближення розрахункових значень функції $\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$ до експериментальних та зменшення середньоквадратичного відхилення досліджений діапазон швидкостей розбили на два піддіапазони із своїми аналітичними залежностями:

для піддіапазону $\dot{\varepsilon} = 10^{-3} \dots 2 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$ /рис. 4, а/

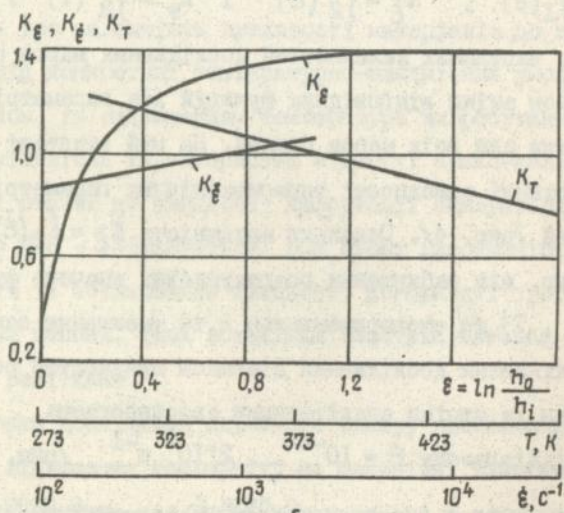
$$\sigma = \sigma_T + (8,2 + 1,3 \cdot \varepsilon \cdot e^{-0,0135 \cdot \varepsilon}) (0,97 \cdot e^{0,0007 \dot{\varepsilon}}) \times \\ \times (1,14 - 0,0023 \cdot T) ; \quad /4/$$

для піддіапазону $\dot{\varepsilon} = 10^2 \dots 2 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ /рис. 4, б/

$$\sigma = \sigma_T + (8,2 + 1,3 \cdot \varepsilon \cdot e^{-0,0135 \cdot \varepsilon}) (0,67 \cdot \dot{\varepsilon}^{0,063}) \times \\ \times (1,28 - 0,0024 \cdot T) \quad , \quad /5/$$



а



б

Рис. 4. Криві узагальнених термомеханічних коефіцієнтів для маловуглецевих сталей.

де σ_T - статична границя текучості, при температурі 293 К дорівнює 255 МПа - для сталі 08КП, 230 МПа - для сталі 08Н, 290 МПа - для сталі 10СП, 215 МПа - для сталі 1КП.

За такої апроксимації відхилення розрахункових значень опору деформації від експериментальних складає: середньоквадратичне відхилення S для сталей 08КП, 08Н, 10СП, 1КП дорівнює 50,6; 49; 46,2 і 52 МПа відповідно; коефіцієнт варіації $V = S / \sigma$ для сталей 08КП, 08Н, 10СП, 1КП дорівнює 8,7; 9,8; 8,0 і 9,5 % відповідно.

При вивченні міцності металів в умовах низьких температур основна увага приділяється проблемі крихкості. Найпоширенішим методом оцінки схильності конструкційних матеріалів до крихкого руйнування є випробування на ударну в'язкість, які показали, що підвищення швидкості удару за інших рівних умов зсуває критичну температуру крихкості в бік вищих значень. На цій підставі приймається припущення про еквівалентність впливу на механічні характеристики металів зниження температури і підвищення швидкості деформації. Однак при високошвидкісному розтяганні $\dot{\epsilon}$ до 10^4 с^{-1} за умов низьких температур /до 77 К/ вищезгадане припущення не підтвердилося.

Отримані результати випробувань як алюмінієвого сплаву Д16, в'язкий характер руйнування котрого є характерним для металів з ГЦК решіткою в умовах криогенних температур, так і армо-заліза, хромонікельмолібденової сталі, низьколегованої конструкційної сталі 09Г2С та двох трубних сталей контрольованої прокатки марки Х70 свідчать про суттєве підвищення характеристик міцності $\sigma_{0,2}$. σ_B при спаді температури і збільшенні швидкості деформації без зниження показників пластичності металів δ, ψ порівняно з такими у статичних випробуваннях /для ілюстрації наведено дані для армо-заліза, рис. 5/.

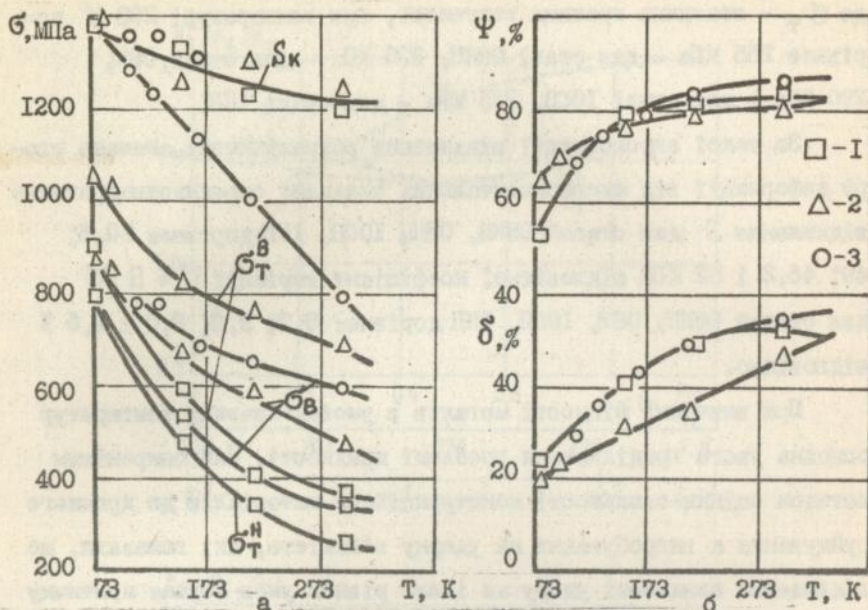


Рис. 5. Залежність характеристик міцності /а/ та пластичності /б/ арко-заліза від швидкості деформування і температури:
 1 - $V = 2 \dots 2,5$ мм/хв; 2 - $V = 5,8$ м/с; 3 - $V \approx 75$ м/с.

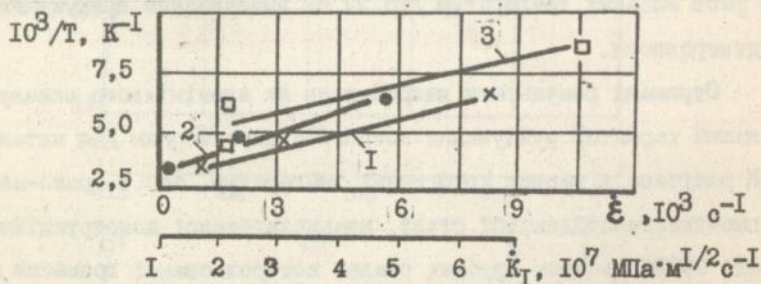


Рис. 6. Зв'язок температури та швидкості навантаження для сталі Г за постійного рівня тріщиностійкості /1,2/ і за постійної величини відносного звуження поперечного перерізу /3/:
 1 - $K_d = 625$ МПа $\cdot\sqrt{м}$; 2 - $K_d = 465$ МПа $\cdot\sqrt{м}$; 3 - $\Psi = 60$ %.

Пізніші дослідження сталей на тріщиностійкість із швидкостями зростання коефіцієнта інтенсивності напружень K_I до $10^6 \dots 8 \cdot 10^7$ МПа $\cdot\sqrt{м}$ /с, проведені В.О.Маковієм з використанням кільцевих зразків з двома попередньо нанесеними симетричними радіальними втомленими тріщинами також показали, що збільшення швидкості навантажування за низьких температур /213 і 153 К/ не є фактором, окрижкуючим матеріал /за швидкостей навантажування більшої від $6 \cdot 10^6$ МПа $\cdot\sqrt{м}$ /с тріщиностійкість сталей незалежно від температури підвищується в кілька разів/.

Аналіз температурно-швидкісної залежності характеристик пластичності хромонікельмолібденової сталі Г при одновісному розтяганні свідчить про зниження температури випробувань із зростанням швидкості деформації, за якої зберігається задана величина відносного звуження поперечного перерізу зразка Ψ . Для цієї ж сталі показано, що із підвищенням швидкості зміни коефіцієнта інтенсивності напружень K_I температура випробування, за якої зберігається той же рівень тріщиностійкості, зменшується /рис. 6/.

Для металів у низькотемпературному діапазоні встановлено, що із підвищенням швидкості деформації границя текучості, зростаючи, за своєю величиною наближається до величини дійсного опору розриву S_k . Як це видно з рис. 5, із зниженням температури випробування армко-заліза за швидкостей розтягання приблизно 75 м/с / $\dot{\epsilon} = V/l_0 \approx 10^4$ с $^{-1}$ / спостерігається лінійне зростання верхньої границі текучості, величина якої за $T \approx 77$ К досягає величини S_k . При цьому всі зразки, випробувані при $T < 100$ К, зруйнувались крижко. Отже, аналогічно до схеми О.Ф.Іоффе, точка перетину кривих верхньої границі текучості і дійсного опору розриву відповідає критичній температурі криж-

кості T_B , і в області температури 77 К для арміко-заліза за даної швидкості деформації $\sim 10^4 \text{ с}^{-1}$ має місце критичний інтервал.

Аналіз результатів високошвидкісних випробувань металів на розтягання за низьких температур показав, що їх поведінка залежно від швидкості деформації та температури описується схемою механічного стану, що враховує два різновиди опору металів руйнуванню: в'язкий зріз та крихий відрив /рис. 7/. У відповідності до цієї схеми перехід металів до крихкого стану за заданої температури визначається критичною швидкістю деформації $\dot{\epsilon}_3$, за якої криві зміни опору деформуванню /границі текучості σ_T / і дійсного опору розриву S_K залежно від швидкості деформації і температури перетинаються.

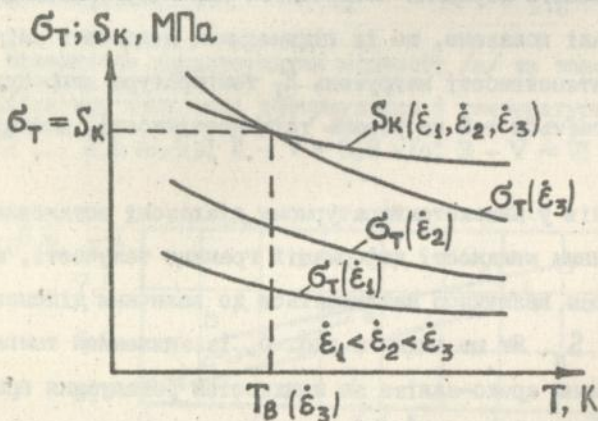


Рис. 7. Схема механічного стану металів.

З метою оцінки в'язкості руйнування низьколегованих конструкційних сталей у широких діапазонах зміни температури /173 ... 323 К/ і швидкості навантажування $10^{-5} \dots 120 \text{ м/с}$ / на стандартних зразках із надрізом було проведено механічні випробування в умовах триточкового згинання падаючим вантажем. Аналіз екс-

периментальних даних з використанням швидкості розкриття вершини тріщини $\dot{\delta}$ та зв'язаної з нею швидкості локальної пластичної деформації $\dot{\epsilon}$ на контурі затушеної вершини дефекту показав, що перехідна температура T_B лінійно залежить від їх логарифма /рис. 8/. Це дозволяє за обмеженими експериментальними даними прогнозувати величину T_B для широкого діапазону зміни швидкості навантажування, причому значення $\dot{\delta}$ і $\dot{\epsilon}$ є ідентичними з точки зору встановлення перехідної температури T_B .

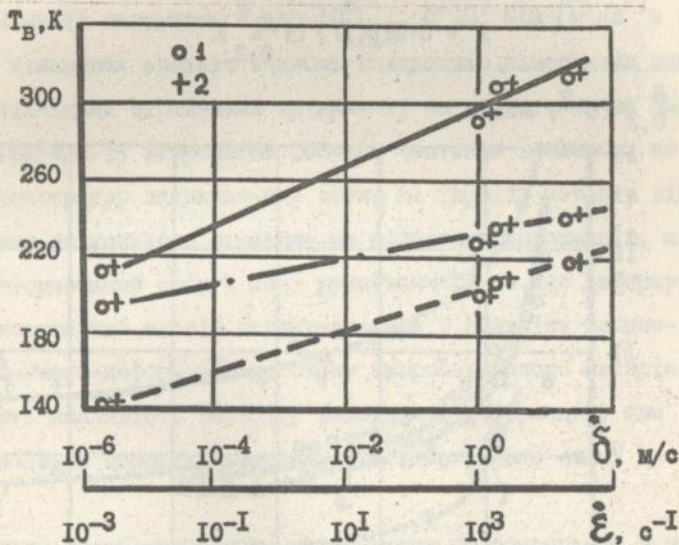


Рис. 8. Зміна температури переходу від квазікрихкого руйнування до в'язкого T_B залежно від логарифма швидкісних параметрів $\dot{\delta}$ і $\dot{\epsilon}$ для сталі 09Г2С /суцільна лінія/ і сталей марки X70, що відрізняються за системою легування: Mn - Ni - Mo - Nb - V /умовне позначення сталь E, штрихова лінія/ та Mn - Ti /умовне позначення сталь Ж, штрихпунктирна лінія/: 1 - $\dot{\delta}$; 2 - $\dot{\epsilon}$.

Величина границі текучості $\sigma_{0,2}^H$, що використовується у розрахунках швидкості локальної пластичної деформації $\dot{\epsilon}$ на кон-

турі затупленої вершини тріщини, для довільних значень температури та швидкості деформації може бути знайдена з експериментальних результатів високошвидкісних випробувань на розтягання. Для досліджених сталей /на основі $\sigma - \dot{\epsilon}$ / встановлено, що величина границі текучості при розтяганні є однозначною функцією температурно-швидкісного параметру $T \cdot \ln(A / \dot{\epsilon})$, де стала $A = 10^8 \text{ c}^{-1}$ /рис. 9/. Отримані експериментальні дані за допомогою методу найменших квадратів апроксимовані функцією

$$Y = C \cdot \exp(D / \sigma_{0,2}^D). \quad /6/$$

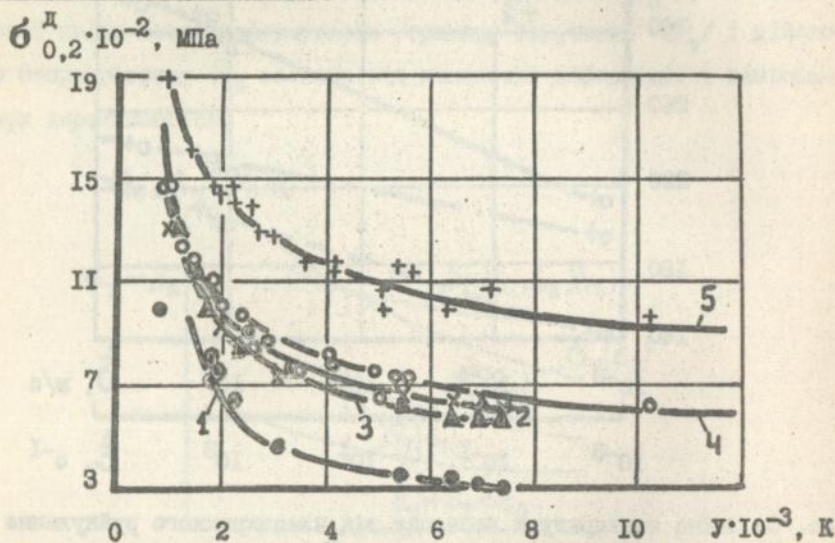


Рис. 9. Залежність умовної границі текучості досліджених сталей $\sigma_{0,2}^D$ від температурно-швидкісного параметру $Y = T \cdot \ln(A / \dot{\epsilon})$:
 1 - сталь 09Г2С, $C = 600,6$, $D = 774,0$; 2 - сталь Е, $C = 228,6$,
 $D = 2101,3$; 3 - сталь Ж, $C = 280,4$, $D = 1815,0$; 4 - сталь Б,
 $C = 198,2$, $D = 2372,0$; 5 - сталь Г, $C = 101,7$, $D = 4297,0$.

/ Крапки - результати експерименту, лінії - апроксимація дослідних даних функцією $Y = C \cdot \exp(D / \sigma_{0,2}^D)$. /

Задовільний збіг з експериментальними даними отриман при розрахунку величини умовної границі текучості цих сталей залежно від температури та швидкості деформації за відомим вираженням, що впливає з термодинамічного аналізу процесу пластичного деформування.

Із зіставлення результатів динамічних випробувань матеріалів на стандартних зразках з надрізом на триточкове згинання падаючим вантажем, на тріщиностійкість із швидкостями наростання коефіцієнта інтенсивності напружень K_I до $10^6 \dots 8 \cdot 10^7$ МПа $\cdot\sqrt{м}$ /с з використанням кільцевих зразків з двома попередньо нанесеними симетричними радіальними втомленими тріщинами, на розтягання на циліндричних зразках із вкороченою робочою частиною впливає, що за низьких температур визначальний вплив на перехід металів від в'язкого стану до крихкого справляє не швидкість деформації, а напружено-деформований стан в зоні руйнування тіла, що деформується. Чим жорсткіший спосіб навантажування і сильніша неоднорідність напружено-деформованого стану випробовуваного матеріалу, що ускладнюють можливість перебігу пластичної деформації, тим легше здійснюється перехід матеріалу від пластичного стану до крихкого.

Результати високошвидкісних випробувань на розтягання у широкому діапазоні температур проаналізовано з позицій кінетичної концепції міцності твердих тіл, що розглядає руйнування як термофлукуаційний процес. Отримані дані свідчать про планну зміну залежності довговічності матеріалів від навантаження в області часу нижче 10^{-3} с в бік вищих значень напружень, що підтверджує аналогічне припущення з точки зору кінетичної концепції міцності.

П'яту главу присвячено дослідженню опору конструкційних матеріалів високошвидкісній деформації за складного напруженого

стану. У ній подано розроблені оригінальні методи механічних випробувань матеріалів за різних видів високошвидкісного навантаження, що дозволяють розширити діапазон реалізованих швидкостей деформації приблизно до $5 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$, та отриманий за їх допомогою великий обсяг нових співставних експериментальних даних щодо механічних властивостей металевих, полімерних та композитних матеріалів. Для кожного виду випробувань на пневмопороховому копрі є свій змінний вузол кріплення зразка.

У випробуваннях на стискання та стискання із зсувом /рис.10/

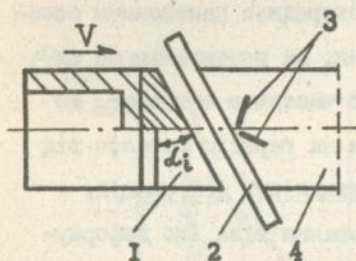


Рис. 10. Схема динамічних випробувань на стискання із зсувом: 1 - бойок; 2 - зразок; 3 - тензорезистори; 4 - динамометр.

використовувані зразки 2, у вигляді балки квадратного перерізу із стороною $a = 2 \dots 4 \text{ мм}$ та завдовжки до 160 мм, встановлюють на торці динамометра 4, виконаного у вигляді пластини з товщиною 12 мм, та завдають по них плоского удару бойком 1 із швидкістю V . Кут нахилу торця динамометра, що дорівнює куту нахилу торця бойка і визначає задане співвідношення нормальної $\dot{\epsilon}_1$ і зсувної $\dot{\epsilon}_{II}$ складових швидкості деформації матеріалу зразка, а саме,

$\alpha_i = \arctg \dot{\epsilon}_1 / \dot{\epsilon}_{II}$, вибирають у діапазоні $0 \dots 60^\circ$ / для випробувань лише на стискання $\alpha_i = 0$, а застосування кута величезного більшого від 60° є недоцільним з конструктивних міркувань/.

Реєстрацію пружної деформації динамометра 4 здійснюють у прямій хвилі навантаження за допомогою тензорезисторів 3, що підключаються до індивідуальних реєстраторів. При цьому для випробувань на стискання тензорезистори наклеюють паралельно осі

динамометра, а для випробувань на стискання із зсувом - під кутом 45° до його навантажуваного торця, що дозволяє визначати напруження, які діють у зразку як вздовж його подовжньої осі τ , так і по нормалі до торця динамометра σ_{\perp} .

У випробуваннях на стискання у зразку реалізується плоский напружено-деформований стан, а у випробуваннях на стискання із зсувом - двовісний напружений та тривісний деформований стан. Проведення випробувань серії зразків на динамометрах з різними кутами нахилу торця у напрямі руху бойка дозволяють отримати експериментальні дані, необхідні для побудови граничної кривої деформування конструкційних матеріалів за динамічних навантажень.

Основою для розрахунку процесів, пов'язаних із прониканням та пробиванням бойком мішені, є знання зусилля упrowadження останнього. У дисертаційній роботі опір упrowadженню бойка в перешкоду визначали за схемою, згідно з якою /рис. II/ зразок

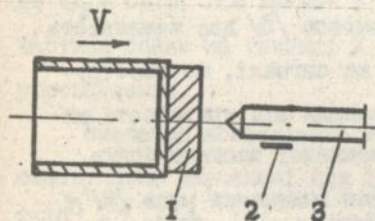


Рис. II. Схема випробувань на упrowadження: 1 - зразок /перешкода/; 2 - тензодатчик; 3 - динамометр /бойок/.

/перешкоду/ 1 розганяють до потрібної швидкості V та завдають удару по нерухомо встановленому в установці динамометру 3 з конічною головною частиною, що грає роль бойка та дозволяє за допомогою тензодатчика 2 визначати зусилля упrowadження за його пружною деформацією. При цьому використання бойка /динамометра/, наконечник якого виконано за одне ціле із стержневою частиною суцільного поперечного перерізу, буде ефективним тільки за дотримання наступних трьох умов вибору розмірів стержневої частини:

$$L > \frac{t_B \cdot c}{2} ; /7/ \quad \frac{D}{c} \leq 0,1 \cdot t_B ; /8/ \quad F = F_1 \sqrt{\frac{E_1 \rho_1}{E \cdot \rho}} , /9/$$

де L , D - відповідно довжина і діаметр стержневої частини бойка; c - швидкість поширення пружної хвилі в стержневій частині бойка; t_B - тривалість випробування; F - площа поперечного перерізу стержневої частини бойка; F_1 - площа поперечного перерізу наконечника на межі із стержневою частиною бойка; E , E_1 - модулі пружності матеріалу відповідно стержневої частини і наконечника бойка; ρ , ρ_1 - щільності матеріалів відповідно стержневої частини і наконечника бойка.

Виконання співвідношення /7/ забезпечує реєстрацію експериментальної діаграми зусилля до приходу поздовжньої хвилі навантаження, відбитої від кінця бойка, протилежного навантажуваному. Вибір максимального діаметра бойка за умовою /8/ дає можливість усереднювати поперечні коливання бойка на сигналі, що реєструється, оскільки їхній період набагато менший від тривалості випробування t_B . У випадку, коли для стержневої частини бойка суцільного поперечного перерізу одночасне виконання умов /8/ і /9/ є неможливим, використовують інші варіанти конструкції бойка.

Аналіз отриманих експериментальних даних свідчить про стійке зростання опору матеріалів упродовженню бойка із збільшенням швидкості деформації. За результатами випробувань на упродовження пружнодеформовуваного бойка з ротиційною головою частиною в поверхневій шарі перешкоди розроблено спосіб визначення коефіцієнта в'язкості $\mu_{\tau} = \partial \tau / \partial \dot{\gamma}$, як коефіцієнта пропорційності між приростом зсувних напружень та швидкості пластичної деформації зсуву, що визначає чутливість опору ма-

теріалів до швидкості деформації і дозволяє зіставляти результати високошвидкісних випробувань, отримані різними методами.

Запропонований спосіб ґрунтується на ефекті зростання опору упровадженню із збільшенням швидкості деформування та усуває необхідну для проведення квазістатичних випробувань зразків вимогу до однорідності напружено-деформованого стану в кінцевому об'ємі матеріалу, оскільки біля вершини наконечника воно є явно неоднорідним. Зняття зазначеного обмеження порівняно з іншими відомими методами дозволило на порядок розширити діапазон досліджуваних швидкостей деформації. З аналізу процесу упровадження конічної головної частини бойка в поверхневі шари зразка /перешкоди/ отримано вираження для коефіцієнта в'язкості матеріалу зразка

$$\mu_{\tau} = \frac{\sigma_s(x, V_1) - \sigma_s(x, V_2)}{v \cdot (V_1 - V_2)} \cdot x, \quad /10/$$

де σ_s - опір, пов'язаний з усталеним обтіканням упровадженої частини бойка на глибині x від поверхні; V_1 і V_2 - швидкості упровадження.

Значення коефіцієнта в'язкості дослідженого алюмінієвого сплаву ДІ6, визначені для діапазону швидкостей деформації до $2 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ /рис. 12/, задовільно погоджуються з результатами, отриманими іншими методами.

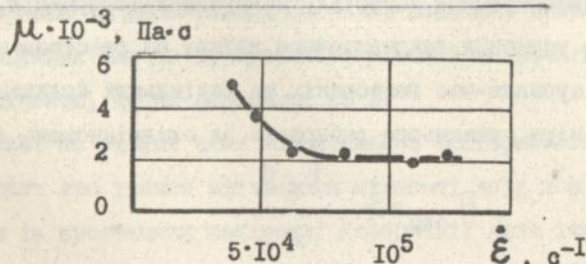


Рис. 12. Залежність коефіцієнта в'язкості сплаву ДІ6 від швидкості деформації.

Дослідження при плоскому напруженому стані із швидкостями умовного відносного зсуву $\dot{\gamma}$ до $10^5 \dots 5 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ проводили за двома схемами, залежно від застосованих зразків умовно поділюваними на зсув і на зріз. Експерименти виконували з параметром $\dot{\gamma} \approx \cos \theta \dot{\epsilon}$, оскільки в області малих пружнопластичних деформацій постійна швидкість деформування V визначає приблизно постійну швидкість умовного відносного зсуву.

У випробуваннях на зсув /рис. 13/ зразок 2, що являє собою

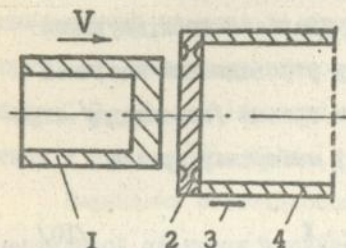


Рис. 13. Схема випробувань на зсув:

1 – бойок; 2 – зразок;

3 – тензорезистор;

4 – динамометр.

диск із двома симетричними кільцевими виточками, що утворюють робочу частину товщиною 3 мм, встановлюють на торці закріпленого динамометра 4 і навантажують ударом бойка 1 по його центральній частині. Наявність у зразку фіксованої робочої частини, в котрій забезпечується приблизно однорідний напружено-деформований стан, дозволяє, приймаючи розподіл дотичних напружень по зрізаному перерізові рівномірним, отримувати за допомогою тензорезисторів 3 діаграму деформування матеріалу напруження-деформація.

З метою усунення викривлюючого впливу на реєстровану діаграму зсуву зусилля-час поздовжніх та радіальних коливань динамометра, розміри останнього вибирають із співвідношень /I/ і /II/

$$D_{\text{сер}} \gg \frac{t_{\text{в}} \cdot c}{\pi}, \quad \text{/II/}$$

де $D_{\text{сер}}$ – середній діаметр динамометра.

Завдяки вибору середнього діаметра динамометра за умовою /II/ період його радіальних коливань T , що дорівнює $\pi \cdot D_{\text{сер}} / C$, набагато перевищує тривалість випробування зразка, внаслідок чого пружна подовжня деформація динамометра, обумовлена його радіальними коливаннями, за час випробування t_B є нехтувано малою.

У випробуваннях на зріз /рис. 14/ зразок 3, що являє собою

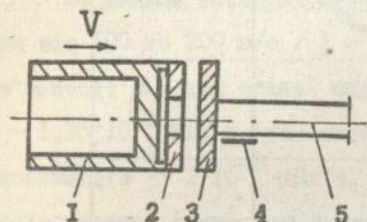


Рис. 14. Схема випробувань на зріз:

1 - боек; 2 - кільце; 3 - зразок;
4 - тензодатчик; 5 - динамометр.

гладку, круглу пластинку діаметром 62 мм і товщиною 3 мм, встановлюють на торці закріпленого динамометра 5, розміри якого вибирають за умовами /7/ і /8/, і навантажують ударом бойка 1 з кільцем 2 на його периферійній частині. З метою якісної оцінки величини швидкості деформації за ширину зони пластичного зсуву /за робочу частину зразка/ приймали величину зазору між динамометром 5 та кільцем 2, що дорівнює половині товщини зразка /1,5 мм/. Відзначимо, що діаметр пробки, яка вибивається у зразку, практично дорівнює діаметру динамометра. Вибір відповідних розмірів зразка та динамометра дозволив зменшити викривлюючий вплив інерційних сил до припустимого рівня і визначати зусилля зрізу з похибкою, що не перевищує 10 %.

Отримані за різних схем навантаження експериментальні результати свідчать про значне підвищення міцності всіх досліджуваних матеріалів із зростанням швидкості деформації /для ілюстрації наведено дані для хромонікельмолібденової сталі, рис. 15, і для капролону, рис. 16/. Так, із збільшенням швидкості деформації стискування до $1,35 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ границя текучості поліарілату ДВ-105

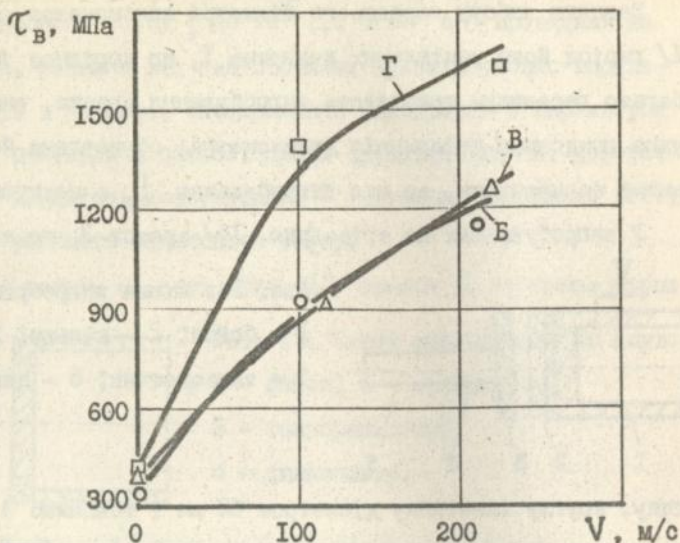


Рис. 15. Залежність границі міцності сталей В, В і Γ від швидкості деформування. / Випробування на зсув. /

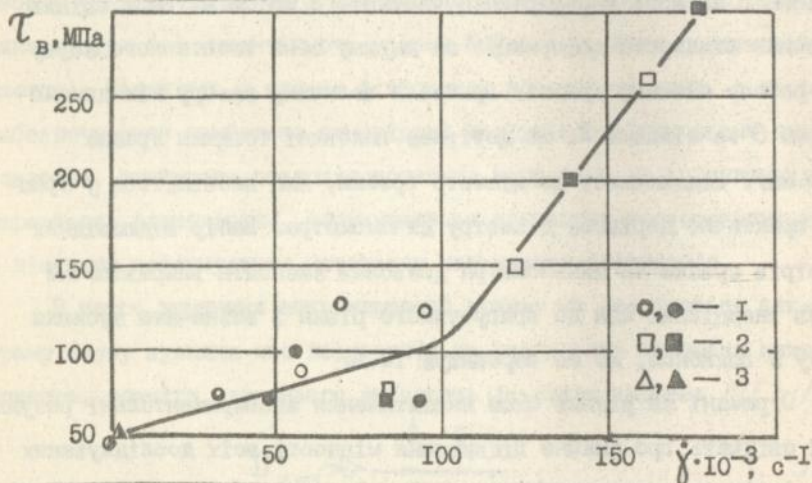


Рис. 16. Залежність границі міцності термостатованого /світлі крапки/ і нетермостатованого /темні крапки/ капролону від швидкості деформації: 1 - випробування на зсув; 2 - випробування на зріз; 3 - випробування на розтягання.

зростає приблизно у 4 рази, а із збільшенням швидкості деформації зсуву до $10^5 \dots 2 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ границя міцності сплаву ДІБ підвищується у 2,5 рази, хромонікельмолібденової сталі, термообробленої на різний рівень міцності, - у 3 ... 4 рази, поліамідів - у 1,5 ... 3 рази, капролону - у 6 разів, епоксидної смоли - у 23 рази.

За даними експериментів, у діапазоні швидкостей деформування від 100 до 200 м/с / $\dot{\gamma} \approx 6,6 \cdot 10^4 \dots 1,3 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ / коефіцієнт в'язкості μ_{τ} для сталей складає $\sim 3 \cdot 10^{-3} \text{ МПа} \cdot \text{с}$, для сплаву ДІБТ $\sim 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ МПа} \cdot \text{с}$, для епоксидної смоли $\sim 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ МПа} \cdot \text{с}$, для поліамідів $\sim 1 \cdot 10^{-3} \text{ МПа} \cdot \text{с}$, що за порядком величини корелює з результатами інших випробувань.

З метою зіставлення отриманих експериментальних даних щодо границі міцності досліджених матеріалів за високошвидкісного зриву з результатами динамічних випробувань на розтягання використовували співвідношення

$$\sigma = 2\tau ; \quad \dot{\epsilon} = \frac{2}{3} \dot{\gamma} . \quad /12/$$

що випливає з третьої теорії міцності. Як видно /рис. 17/, перераховані із врахуванням вищенаведених співвідношень результати динамічних випробувань на зсув і на зрив корелюють з відповідними значеннями міцності при розтяганні і свідчать про найінтенсивніше зростання опору матеріалів деформуванню за швидкостей деформації більших від $5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$.

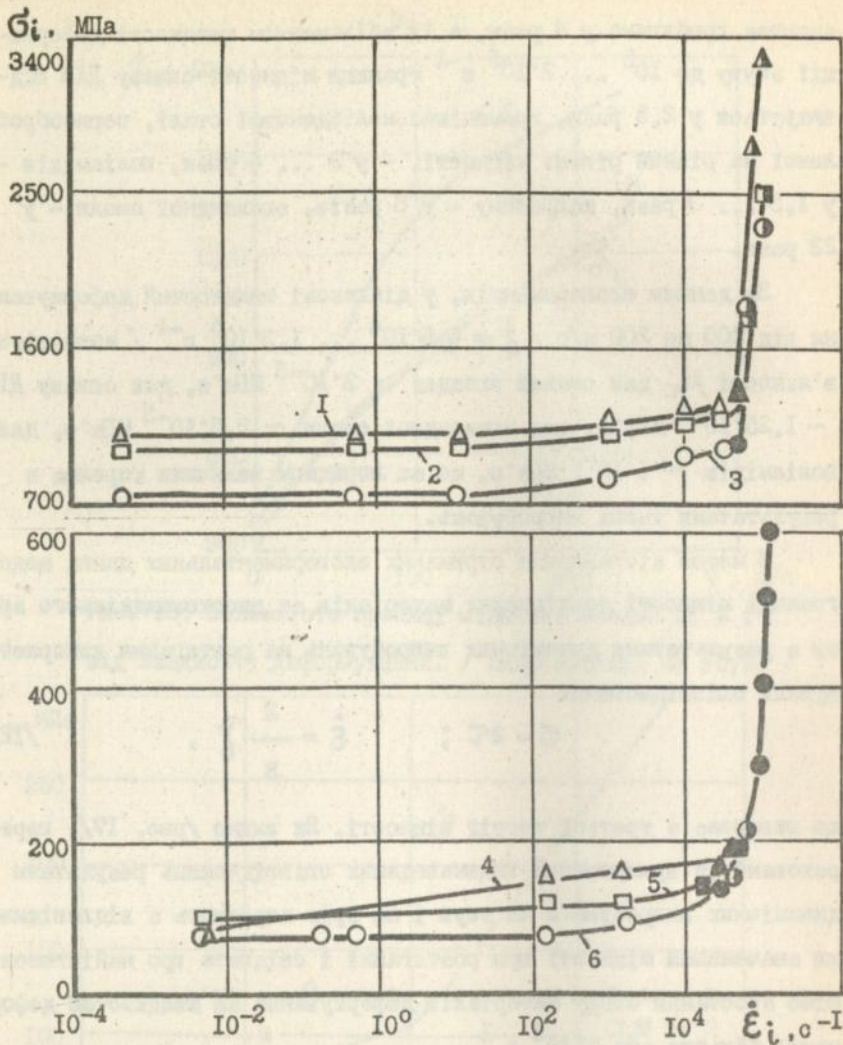


Рис. 17. Залежність опору досліджених матеріалів деформуванню від швидкості деформації: 1 - сталь Г; 2 - сталь В; 3 - сталь В; 4 - поліамід ПА 6-ЛТ-СВУ2; 5 - поліамід ПА 66-І-Л-СВ30; 6 - капролон. /Світлі крапки - випробування на розтягання, напівтемні - випробування на зсув, темні - випробування на зріз./

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

У дисертації в результаті виконаного комплексу досліджень здійснено розв'язання великої наукової проблеми, що полягає у розробці науково-обґрунтованих методів високошвидкісних механічних випробувань конструкційних матеріалів, створенні нового випробувального обладнання та встановленні основних закономірностей зміни опору матеріалів деформуванню та руйнуванню у широкому діапазоні температурно-швидкісних умов навантаження.

Реалізація розроблених науково-обґрунтованих технічних рішень вносить помітний вклад у науково-технічний прогрес.

На підставі проведених досліджень може бути сформульовано наступні основні результати та висновки:

1. Розроблено оригінальні методи механічних випробувань конструкційних матеріалів за різних видів високошвидкісного навантаження і створено нове випробувальне обладнання, яке порівняно з відомим раніше на 1 ... 2 порядки розширює діапазон реалізовуваних швидкостей деформації приблизно до $5 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ з реєстрацією повних діаграм зусилля-час.

2. Для діапазонів швидкостей деформації $10^{-3} \dots 10^4 \text{ с}^{-1}$ і температур $77 \dots 773 \text{ К}$ розроблено метод механічних випробувань на розтягання з використанням ідентичних циліндричних зразків із скороченою робочою частиною, зв'язаних нарізним з'єднанням із стаціонарним трубчастим динамометром.

3. Експериментально встановлено та числовим моделюванням підтверджено, що випробування на одновісне розтягання забезпечують гранично досяжну швидкість пластичної деформації порядку $5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$. Поведінка матеріалів за більших швидкостей деформації /приблизно до $5 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ / дозволяють вивчати методи механічних

вигробувань на стискання, стискання із зсувом, упровадження конічного бойка в перешкоду, зріз.

4. Отримано великий обсяг нових співставних експериментальних даних про механічні властивості металічних, полімерних і композитних матеріалів у широкому діапазоні температурно-швидкісних умов навантаження. Експериментально доведено, що із зростанням швидкості деформації міцність металів підвищується без зниження пластичності. На відміну від металів підвищення із зростанням швидкості деформації міцності полімерних матеріалів супроводжується падінням пластичності.

Результати проведених досліджень відповідають встановленим раніше закономірностям поведінки конструкційних матеріалів за динамічних навантажень, що свідчить про вірогідність розроблених методів. Отримано, що чутливість металів до швидкості деформації залежить від будови кристалічної решітки, особливостей структурного стану і визначається конкретними температурно-швидкісними умовами деформування.

5. Вперше встановлено відсутність еквівалентності впливу на механічні властивості металів зниження температури /до 77 K/ і підвищення швидкості деформації /до 10^4 c^{-1} /. З аналізу отриманих результатів випливає, що за низьких температур вирішальний вплив на перехід металів із в'язкого стану до крихкого справляє не швидкість деформації, а напружено-деформований стан в зоні руйнування тіла, що деформується. Встановлено, що поведінка металів залежно від швидкості деформації і температури якісно описується схемою механічного стану, аналогічною схемі О.Ф. Іоффе.

6. Підтверджено лінійний взаємозв'язок між температурою переходу металу від квазікрихкого до в'язкого руйнування T_B і швидкостями розкриття вершини тріщини та локальної пластичної дефор-

зації на контурі її затуленої вершини, що дозволяє за обмеженими експериментальними даними прогнозувати величину T_B для широкого діапазону зміни швидкості навантаження.

7. З достатньою для інженерної практики точністю у широкому температурно-швидкісному діапазоні розглянуто можливість розрахункової оцінки динамічної границі текучості на підставі термодинамічного аналізу процесу пластичного деформування, якщо відомі термоактиваційні параметри для класу матеріалів, що розглядається.

8. На підставі узагальнення отриманих експериментальних даних розроблено аналітичні залежності опору маловуглецевих сталей деформуванню від ступеня і швидкості деформації, а також від температури, використання яких стосовно до процесів тонколистової прокатки металів /уточнені розрахунки тиску металу на валки, вибір раціональних величин обтискання/ дозволило підвищити продуктивність станів холодної прокатки.

9. Методичні розробки і результати досліджень використані в зацікавлених науково-дослідних організаціях і підприємствах для оцінки міцності матеріалів та конструкцій, що зазнають дії імпульсних навантажень, і оптимізації технологічних процесів високошвидкісної металообробки із сумарним річним економічним ефектом від запровадження в один мільйон карбованців за курсом 1990 р.

Зміст роботи відображено в наступних основних публікаціях:

1. Ващенко А.П., Степанов Г.В. Установки для исследования конструкционных материалов при высокоскоростном деформировании в широком диапазоне температур // Пробл. прочности.- 1973.- № 12.- С. 100-102.

2. Степанов Г.В., Ващенко А.П. Методика измерения деформаций в стержнях емкостным тензодатчиком // Пробл. прочности.- 1975.- № 12.- С. 104-105.
3. Характеристики полупроводниковых тензорезисторов в упругих волнах / Г.А.Абрамчук, В.А.Алехин, А.П.Ващенко и др. // Пробл. прочности.- 1977.- № 6.- С. 116-118.
4. Ващенко А.П., Степанов Г.В. О выборе образца и динамометра для высокоскоростных испытаний на растяжение // Пробл. прочности.- 1977.- № 10.- С. 84-88.
5. Ващенко А.П. Механические свойства некоторых металлов при ударном растяжении в диапазоне температур от 20 до 500°C // Пробл. прочности.-1977.- № 9.- С. 97-99.
6. Ващенко А.П. Влияние низких температур и скорости деформирования на механические свойства некоторых металлов // Пробл. прочности.- 1978.- № 1.- С. 87-91.
7. Абрамчук Г.А., Ващенко А.П., Степанов Г.В. О методике определения переходных характеристик тензорезисторов // Пробл. прочности.- 1978.- № 10.- С. 97-99.
8. Романченко В.И., Ващенко А.П. О силовой зависимости долговечности стали в области микросекундных времен // Доклады АН УССР. Сер. А.- 1980.- № 11.- С. 63-65.
9. Ващенко А.П., Романченко В.И. Измерение "времени жизни" некоторых металлов при импульсном растяжении // Детонация: Материалы II Всесоюз. совещания по детонации (Черноголовка, 1981 г.).- Черноголовка: ИХФ АН СССР, 1981.- С. 142-145.
10. Механические свойства высокопрочного алюминиевого сплава при ударном нагружении / Г.В.Степанов, В.В.Астанин, В.И.Романченко, А.П.Ващенко и др. // Пробл. прочности.- 1983.- № 2.- С. 59-63.

11. Степанов Г.В., Ващенко А.П. Определение коэффициента вязкости алюминиевого сплава Д16 при внедрении конуса // Пробл. прочности.- 1984.- № 10.- С. 109-113.
12. Ващенко А.П. Высокоскоростные испытания на срез конструкционных материалов // Пробл. прочности.- 1985.- № 4.- С. 66-69.
13. Ващенко А.П. Влияние скорости нагружения на сопротивление материалов деформированию // Динамическая прочность и трещиностойкость конструкционных материалов: Тр. I Республ. семинара.- Киев: КВИРТУ ПВО, 1986.- С. 86-93.
14. Ващенко А.П. Влияние скорости деформации на коэффициент концентрации напряжений // Концентрация напряжений в элементах авиационных двигателей: Межвуз. науч. сб. № 4.- Уфа: Уфим. авиац. ин-т, 1986.- С. 63-68.
15. Ващенко А.П., Степанов Г.В., Сафаров Э.Г. Динамическое сопротивление конструкционных материалов срезу // Пробл. прочности.- 1987.- № 2.- С. 45-47.
16. Влияние скорости деформации на механические свойства и характер разрушения высокопрочной стали / А.П.Ващенко, А.С.Духовный, Г.В.Степанов и др. // Пробл. прочности.- 1987.- № 3.- С. 62-64.
17. Динамическая прочность и трещиностойкость металлов при низких температурах / Г.В.Степанов, А.П.Ващенко, В.А.Маковой, В.М.Токарев // Пробл. прочности.- 1988.- № 10.- С. 26-29.
18. Механические свойства капролона при динамическом нагружении / Г.В.Степанов, А.П.Ващенко, В.И.Зубов и др. // Пробл. прочности.- 1989.- № 2.- С. 53-55.

19. Ващенко А.П., Токарев В.М. Высокоскоростные испытания малоуглеродистых сталей применительно к режиму холодной прокатки // Динамическая прочность и трещиностойкость конструкционных материалов: Тр. II Республ. семинара.- Киев: КВТИУ, 1989.- С. 76-82.
20. Ващенко А.П. Методические особенности высокоскоростных испытаний конструкционных материалов на растяжение и сжатие // Динамическая прочность и трещиностойкость конструкционных материалов: Тр. II Республ. семинара.- Киев: КВТИУ, 1989.- С. 83-86.
21. Влияние скорости нагружения на механические свойства сталей разного уровня прочности / А.П.Ващенко, Г.В.Степанов, В.М.Токарев и др. // Пробл. прочности.- 1989.- № 10.- С. 42-48.
22. Механические свойства малоуглеродистых сталей в широком диапазоне температур и скоростей деформации применительно к процессам тонколистовой прокатки / А.П.Ващенко, Г.Н.Сунцов, Г.В.Белалова и др. // Пробл. прочности.- 1990.- № 8.- С. 76-84.
23. Влияние высокоскоростного деформирования и температуры на характеристики прочности и пластичности хромоникельмолибденовой стали / А.П.Ващенко, В.П.Леонюв, В.М.Токарев, А.С.Эглит // Пробл. прочности.- 1991.- № 9.- С. 17-19.
24. Влияние скорости деформирования на характеристики прочности и пластичности полиамидов / А.П.Ващенко, В.А.Гуськов, Э.Т.Сафаров и др. // Пробл. прочности.- 1991.- № 9.- С. 19-22.
25. Механические свойства полимерных и композитных материалов при различных видах высокоскоростного нагружения /

- А.П.Ващенко, Э.Г.Сафаров, В.А.Гуськов, С.А.Закощиков // Механика композитных материалов.- 1991.- № 6.- С. 1103-1108.
26. Ващенко А.П. Экспериментальные исследования механических свойств конструкционных материалов при различных видах динамического нагружения // Экстремальные состояния веществ: Сб. науч. тр. под ред. В.Е.Фортова и Е.А.Кузьменкова.- М.: ИВТАН, 1991.- С. 210-217.
27. Ващенко А.П., Маковой В.А. Динамическая прочность и трещиностойкость металлов в диапазоне температур 293 ... 77 К // Физ.-хим. механика материалов.- 1992.- № 1.- С. 14-18.
28. Оценка вязкости разрушения конструкционных сталей в условиях высокоскоростного деформирования / В.И.Кирьян, А.П.Ващенко, Л.А.Волгин, С.В.Шамановский // Пробл. прочности.- 1993.- № 5.- С. 51-59.
29. А.с. 491082 СССР, МКП³ & ОI N 3/30. Способ динамических испытаний материалов на растяжение / Г.В.Степанов, А.П.Ващенко // Открытия. Изобретения.- 1975.- № 41.- С. 162-163.
30. А.с. 775656 СССР, МКП³ & ОI N 3/06. Динамометр для испытаний материалов на растяжение / Г.В.Степанов, А.П.Ващенко // Открытия. Изобретения.- 1980.- № 40.- С. 232.
31. А.с. 796705 СССР, МКП³ & ОI N 1/28. Образец для ударных испытаний материалов / Г.В.Степанов, А.П.Ващенко // Открытия. Изобретения.- 1981.- № 2.- С. 185.
32. А.с. 796718 СССР, МКП³ & ОI N 3/30. Установка для высокоскоростных испытаний материалов на растяжение / А.П.Ващенко, Г.В.Степанов // Открытия. Изобретения.- 1981.- № 2.- С. 186.
33. А.с. 800809 СССР, МКП³ & ОI N 3/30. Устройство для динамических испытаний образцов на срез / А.П.Ващенко, Г.В.Степанов // Открытия. Изобретения.- 1981.- № 4.- С. 171.

34. А.с. I040353 СССР, МКИ³ G 01L 5/00. Способ определения усилия внедрения бойка / Г.В.Степанов, А.П.Ващенко // Открытия. Изобретения.- 1983.- № 33.- С. 175.
35. А.с. II46577 СССР, МКИ³ G 01N 3/30. Способ определения коэффициента вязкости материала / Г.В.Степанов, А.П.Ващенко // Открытия. Изобретения.- 1985.- № II.- С. 129-130.
36. А.с. II95221 СССР, МКИ⁴ G 01N 3/06. Динамометр к установкам для ударных испытаний материалов / А.П.Ващенко, Г.В.Степанов // Открытия. Изобретения.- 1985.- № 44.- С. 191.
37. Решение о выдаче патента на изобретение от 28.05.92 г. по заявке № 4876685/28 (088061), МКИ⁵ G 01N 3/30. Способ создания в образце нормальных и касательных напряжений при ударном воздействии / А.П.Ващенко, Г.В.Степанов.
38. Ващенко А.П. Механические свойства сталей разного уровня прочности при высокоскоростном растяжении / АН УССР, Ин-т пробл. прочности.- Препринт.- Киев, 1989.- 48 с.
39. Ващенко А.П. Механические свойства конструкционных материалов при различных видах высокоскоростного нагружения / АН Украины, Ин-т пробл. прочности.- Препринт.- Киев, 1992.- 52 с.
40. Ващенко А.П. Механические свойства конструкционных материалов при динамическом нагружении в широком диапазоне температур / АН Украины, Ин-т пробл. прочности.- Препринт.- Киев, 1992.- 54 с.
41. Степанов Г.В., Ващенко А.П. Установки для исследования характеристик динамической прочности материалов со скоростями нагружения до 500 м/с // Международная конференция по измерительной технике и приборостроению (ИМЕКО) "Испытательное оборудование для экспериментальных исследований механических

- свойств материалов и конструкций" (Москва, 1989 г.): Тез. докл.- М.: ВНИИЭ (ИНФОРМПРИБОР), 1989.- Ч. I.- С. 94-97.
42. Ващенко А.П. Испытания на сжатие с высокими скоростями // III Республ. семинар "Динамическая прочность и трещиностойкость конструкционных материалов при однократном импульсном нагружении" (Киев, 1991 г.): Тез. докл.- Киев: ИПП АН Украины, 1991.- С. 77.
43. Ващенко А.П. Динамическая прочность и пластичность конструкционных материалов // 8 Междунар. конф. "Уравнения состояния" (Эльбрус, 1992 г.): Тез. докл. - М.: ИВТАН, 1992.- С. 28.
44. Ващенко А.П. Динамические испытания материалов при сложном напряженном состоянии // IV симп. "Прочность материалов и элементов конструкций при сложном напряженном состоянии" (Севастополь, 1992 г.): Тез. докл.- Киев: ИПП АН Украины, 1992.- С. 16.

Вашенко А.П. Деформирование и разрушение конструкционных материалов при высокоскоростной деформации ($10^2 \dots 10^5 \text{ с}^{-1}$) и температурах 77 ... 773 К.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.09 – динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры, Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, 1995. Защищается 53 научные работы и 9 авторских свидетельств, в которых представлены разработанные методы и установки для механических испытаний конструкционных материалов при различных видах высокоскоростного нагружения, а также результаты экспериментальных исследований. Установлено отсутствие эквивалентности влияния понижения температуры и повышения скорости деформации на механические свойства металлов. Осуществлено промышленное внедрение методических разработок и результатов исследований.

Vashchenko A.P. Deformation and Fracture of Engineering Materials at High Strain Rates ($10^2 \dots 10^5 \text{ s}^{-1}$) and at Temperatures 77 ... 773 K. Thesis for a degree of a Doctor of Sciences in Engineering in the speciality 05.02.09 – dynamics, strength of machines, devices and apparatus, Institute for Problems of Strength of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, 1995.

53 scientific works and 9 author's certificates are being defended, which include the methods and equipment developed for mechanical testing of engineering materials at different types of high-rate loading, as well as the results of experimental investigations. The absence of the equivalent influence of the temperature decrease and strain rate increase upon the mechanical properties of metals has been established. The methods developed and the experimental results have been adopted in industry.

Ключові слова: швидкість деформації, температура, конструкційні матеріали, міцність, пластичність.

Підп. до друку 28.09.95. Формат 60x84/16. Папір офс.
Офс. друк. Ум. друк. арк. 2,79. Ум. фарбо-відб. 2,91.
Обл.-вид. арк. 2,0. Тираж 100 прим. Зам. 342.

Дільниця ротаритного друку ВНТІ ІПМіц. НАН України.
252014, Київ-14, вул. Тімірязєвська, 2.

447147

AB 32 494
AB 33.494