

СТАРЧЕНКО В.В., КАМЧАТНАЯ-СТЕПАНОВА К.В., ГЛАВЧЕВА Ю.М., ВОЛОШКІНА І.В., КЛОЧКО Л.В., ВОЛОШКІН М.Д.

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВІБРОСТАБІЛІЗАЦІЇ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ КРУПНОГАБАРИНИХ СТАНИН ВАЖКОГО ВЕРСТАТОБУДУВАННЯ

У статті розглянуто вдосконалення процесу інтегрованих технологій забезпечення точності виготовлення станин важких верстатів з застосуванням передових технологій вібростабілізації на різних резонансних частотах перед виконанням проміжних та фінішних операцій шліфування станин важких верстатів. Проведено аналіз кінематичних, механічних та теплових характеристик процесу з забезпеченням стабілізації внутрішніх напружень. Обґрунтовано умови оптимального шліфування чи лезової обробки, що дозволяють підвищити точність та якість поверхневого шару. Характеристики загартованих станин важких верстатів прямо залежить від параметрів поверхневого шару конструкторських, технологічних баз та внутрішніх напружень, які проявляються через деякий час негативним чином, як відхилення параметрів точності, деформації, утворення мікро та макротрещин на поверхні, які руйнують станини.

Ключові слова: інтегровані технології, внутрішні напруження, вібростабілізація на різних резонансних частотах, станини важких верстатів, точність та якість поверхневого шару, деформації, утворення мікро та макротрещин, руйнування станини.

STARICHENKO V., KAMCHATNAYA-STEPANOVA K., GLAVCHEVA Y., VOLOSHKINA I., KLOCHKO L., VOLOSHKIN M.

INTEGRATED VIBRATION STABILIZATION TECHNOLOGY TO ENSURE THE ACCURACY OF MANUFACTURING OF LARGE-SIZED MACHINERY BEDS

The article considers the improvement of the process of integrated technologies for ensuring the accuracy of manufacturing heavy machine tool beds using advanced vibration stabilization technologies at different resonant frequencies before performing intermediate and finishing operations. grinding heavy machine tool beds. An analysis of the kinematic, mechanical and thermal characteristics of the process with the stabilization of internal stresses is carried out. The conditions of optimal grinding or blade processing are substantiated, which allow to increase the accuracy and quality of the surface layer. The characteristics of hardened heavy machine tool beds directly depend on the parameters of the surface layer of the design, technological bases and internal stresses, which manifest themselves after some time in a negative way, as deviations from accuracy parameters, deformations, the formation of micro and macro cracks on the surface that destroy the beds.

Keywords: integrated technologies, internal stresses, vibration stabilization at different resonant frequencies, heavy machine tool beds, accuracy and quality of the surface layer, deformations, the formation of micro and macro cracks, bed destruction.

Вступ. Одним із найважливіших завдань сучасного машинобудування є розвиток таких стратегічних галузей, як важке верстатобудування, приладобудування. Розвиток цих галузей залежить від забезпечення підприємств високотехнологічним обладнанням, що потребує високої точності виготовлення. Важке верстатобудування, як базова галузь, зосереджена в регіонах з розвинутою науково-дослідною та виробничою інфраструктурою. Підвищення точності та продуктивності важких верстатів є актуальною науково-технічною проблемою, яка має істотний вплив на якість кінцевої продукції. За рахунок вдосконалення процесу інтегрованих технологій забезпечується точність виготовлення станин важких верстатів підвищеної ступені точності з застосуванням передових технологій вібростабілізації на різних резонансних частотах перед виконанням проміжних та фінішних операцій шліфування станин важких верстатів. Основні завдання, що стоять перед машинобудуванням є підвищення ефективності виробництва, його інтенсифікація та поліпшення якості продукції.

З плином часу через перерозподіл і релаксацію внутрішніх залишкових напружень, викликаних технологічними процесами при виготовленні (лиття, зварювання, механічна обробка тощо), втрачається стабільність геометричних розмірів деталей. У процесі релаксації напружень пружні деформації переходять у пластичні, внаслідок чого величини залишкових напружень знижуються. Нерівномірність протікання в металі цього процесу порушує рівноважний стан, викликаючи пружну деформацію деталі зі зміною її геометричної форми. Підвищення стабільності геометричних розмірів досягається переважно за рахунок зниження внутрішніх залишкових напружень і мікропластичних деформацій в матеріалі деталі.

Для забезпечення розмірної стабільності деталей в машинобудуванні найчастіше використовуються традиційні технологічні процеси — низькотемпературний відпал і природне старіння, вкрай недостатньо впроваджується вібраційна обробка деталей. В останні роки у зв'язку з розробкою і впровадженням нового сучасного віброобладнання (віброкомплекси), що дозволяє виконувати вібростабілізуючу обробку деталей, виявилася висока ефективність цього методу обробки деталей і конструкцій. Вібростабілізуюча обробка в багатьох випадках заміняє дорогу термічну обробку, що вимагає великих енергетичних витрат, та забруднює навколишнє середовище. Важливість і актуальність вирішення проблеми стабільності геометричних розмірів виробів на основі новітніх досягнень науково-технічного прогресу безсумнівна. Впровадження прогресивної вібростабілізуючої обробки забезпечує, порівняно з термічним методом, зниження витрат електроенергії (газу) більш ніж у 100 разів, скорочення технологічного циклу виробництва — в 50-60 разів, підвищило в кілька разів продуктивність праці, знизило трудомісткість виготовлення і транспортні витрати в кілька разів, поліпшило умови праці і виключило забруднення навколишнього середовища. Питання вібростабілізуючої обробки деталей і конструкцій, незважаючи на актуальність, досить слабо висвітлені в літературі, що містила досить мізерні, суперечливі і частково застарілі уявлення про можливості і досягаються результати.

© В.В.Старченко, К.В. Камчатная-Степанова, Ю.М. Главчева, В.І.Волошкіна, Л.В.Клочко, М.Д.Волошкін. 2025

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Виникнення залишкових напружень у процесі виготовлення

зварних і литих станин важких високоточних верстатів (Рис. 1) характеризується напруженим станом, обумовленим неоднорідністю пластичних, лінійних і об'ємних деформацій. Виникнення і перерозподіл залишкових напружень завжди пов'язане з деформацією деталі або конструкції.



Рис. 1 – Різновідності кнструкцій важких високоточних станин та металорізальних верстатів

Деформація, що виникає, може бути тимчасовою або незворотною, що викликається відповідно тимчасовими або внутрішніми напруженнями. Внутрішні напруження поділяються на напруження I роду (врівноважуються в межах областей, розміри яких одного порядку з розмірами кля, викликані неоднорідністю силового, температурного або матеріального поля всередині тіла); напруження II роду або кристалітні (врівноважуються в обсягах одного порядку з розмірами зерен) і напруження III роду (врівноважуються в обсягах одного порядку з елементарною кристалічною коміркою).

Під впливом різних технологічних операцій, що викликають зміни в металі, виникають внутрішні напруження. У деяких випадках внутрішні напруження створюються навмисно для поліпшення якісних характеристик виробу (поверхневий наклеп, гартування, хіміко-термічна обробка), а при литті, штампуванні, зварюванні, механічній обробці внутрішні напруження, що виникають, навпаки, знижують стабільність виробу, внаслідок чого знижується якість продукції.

Виникнення залишкових напружень пов'язане з різними процесами, що відбуваються в металі. Протягом однієї технологічної операції можуть діяти один або кілька факторів різної природи [6].

Температурні залишкові напруження з'являються в разі нерівномірного розподілу температури по перетину деталі. Величина і характер температурних напружень залежать від швидкості нагрівання і охолодження, від розмірів і форми деталі, від коефіцієнтів теплопровідності і теплопередачі. Велике значення має швидкість охолодження і температура, з якої починається охолодження.

З підвищенням температури, від якої проводилося охолодження, максимальні напруження збільшуються. Особливо різке збільшення напружень відбувається при $t_0 > 500^{\circ}\text{C}$. Найбільші напруження отримуються при максимальній швидкості охолодження у воді (осьові напруження до 600 МПа), а при охолодженні на повітрі напруження не перевищують 60 МПа.

Залишкові напруження утворюються в разі нерівномірного нагрівання по перетину деталі. При швидкому охолодженні деталі зовнішні її шари, що охолоджуються швидше, будуть розтягнуті. Серцевина під дією 60ле холодніших шарів буде стиснута. Якщо в цей момент виникаючі напруження виявляться вище межі пропорційності при даній температурі, то відбудеться пластична деформація. Можливий випадок, коли температурні напруження в зовнішніх шарах перевищать межу міцності металу і утвориться тріщина («гаряча тріщина»).

При подальшому охолодженні деталі інтенсивність охолодження зовнішніх шарів зменшується і різниця температур між поверхнею і серцевиною також зменшується. У цей момент поверхня вже має температуру, практично рівну температурі навколишнього середовища, і подальша температурна деформація зовнішніх шарів припиняється. Серцевина, що має більш високу температуру, буде продовжувати інтенсивно охолоджуватися, змінюючи об'єм. Якщо зовнішні шари були пластично деформовані в перший період, то в нексугорий момент другого періоду, коли температура серцевини ще досить висока, настає рівновага між зовнішніми шарами і серцевиною, і напруження в деталі будуть дорівнювати нулю. При подальшому охолодженні зовнішні шари будуть деформуватися мало, а серцевина буде прагнути істотно скорочуватися.

Тому серцевина буде стискати зовнішні шари, які, в свою чергу, будуть розтягувати серцевину. У момент закінчення процесу охолодження величина напружень може перевищити межу пружності і відбудеться повторна пластична деформація, але вже зворотного знака [14].

Зварні конструкції складаються з великої кількості елементів і зварних швів, внутрішні напруження яких взаємодіють і можуть розподілятися по-різному. Послідовність приварювання і жорсткість елементів істотно впливають на залишкові напруження.

Характерними особливостями зварювання є його локальний характер, високі швидкості нагрівання до температур, що перевищують температури плавлення металу (3000°C при газовому і 4000°C при електродуговому зварюванні), що викликає температурні напруження, неоднорідні структурні перетворення в шві і зонах термічного впливу, зміну розчинності газів, що оточують зварний шов. Обсяг зони розподілу залишкових напружень залежить від потужності та тривалості нагрівання, а також від структурних перетворень, що відбуваються в зоні, яка безпосередньо примикає до зварному шву (20-25 мм при електродуговому і 80 мм при газовому зварюванні).

Внаслідок структурних перетворень змінюється питомий об'єм, оскільки при нагріванні перехід перліту і фериту в аустеніт супроводжується зменшенням питомого об'єму, а при охолодженні перетворення аустеніту в маргеніт супроводжується значним збільшенням питомого об'єму. Крім того, внаслідок нерівномірного охолодження деталей структурні перетворення в усьому обсязі відбуваються не одночасно і в міру охолодження всього перетину розподіл структурних напружень змінюється. У низьковуглецевих сталях розпад аустеніту відбувається при охолодженні відбувається при температурі і мало впливає на залишкові напруження, а в легованих сталях при охолодженні розпад аустеніту при більш низьких температурах, коли метил знаходиться в пружному стані і викликає структурні залишкові напруження, тобто величина залишкових напружень, викликаних фазовими перетвореннями, залежить від хімічного складу сталі [17, 18].

На величину і характер розподілу залишкових напружень у литті впливають нерівномірне охолодження виливків, опір форми усадці металу і різниця в коефіцієнтах температурного розширення різних частин вилівка. Рівномірність охолодження у формі залежить від конфігурації деталі і складу метилу. Основне значення має не абсолютна різниця температур у різних точках, а характер їх зміни по перетину,

Крім того, при литті деталей складної форми на утворення тимчасових напружень впливає опір деформації ливарної форми і стрижнів, що знаходяться у внутрішніх порожнинах, так як різні ділянки виливків мають різні пластичні властивості і виникають сили опору стрижнів усадці металу, створюючи нерівномірний напружений стан.

Найвідповідальнішим моментом у ливарному виробництві є охолодження виливків у формі, оскільки в разі нерівномірного розподілу температури по перетину виливків виникають залишкові напруження. Напруження в основному залежать від швидкості охолодження і температури, з якої починається охолодження - різке збільшення напружень спостерігається при 500°C . Збільшення швидкості охолодження сприяє збільшенню внутрішніх напружень. Так, наприклад, при максимальній швидкості охолодження у воді виникають напруження, в 10 разів більші за напруження при охолодженні на повітрі. Неправильний вибір режиму охолодження. Охолодження може викликати викривлення деталі, появу «гарячих» або «холодних» тріщин. Охолодження при температурах нижче 400°C надає металу високу пластичність і міцність.

Особливо великий вплив на утворення залишкових напружень швидкість охолодження має при переході металу з пластичного в пружний стан (для чавуну температурний діапазон $400-700^{\circ}\text{C}$), а при температурах нижче і вище цього інтервалу вона мало позначається. На практиці охолодження металу відбувається повільно і напруження, викликані структурною неоднорідністю, мало впливають на загальний рівень напружень і зазвичай знімаються за рахунок релаксації.

Лиття є однією з найпоширеніших і найвідоміших технологічних операцій виготовлення корпусних чавунних деталей, від стабільності форми яких, що обумовлюється перерозподілом залишкових напружень, що виникають після охолодження виливків, в основному залежить точність виготовлених механізмів [10, 16].

Мета дослідження. Предмет дослідження: Розрахунок оптимальних умов вібростабілізації з метою найбільшого зменшення умов шліфування. Аналіз і вдосконалення технологічних особливостей шліфування станин важких токарних верстатів із метою визначення кінематичних закономірностей, дослідження механізмів утворення рельєфу шліфувального круга та оптимізації режимів обробки для забезпечення високої точності та продуктивності

Об'єкт дослідження: Шліфувальні станини важких верстатів, які проходять віброобробку на різних резонансних частотах з метою стабілізації внутрішніх напружень

Основна частина. Механічна обробка (точіння, фрезерування, шліфування тощо), як правило, викликає появу в поверхневому шарі значних залишкових напружень.

Джерелом появи залишкових напружень при механічній обробці є одночасна дія наступних факторів:

1. Нерівномірна пластична деформація поверхневого шару. У зоні перед інструментом матеріал стискається передньою поверхнею інструменту, а в іншій зоні при терті задньої поверхні інструменту оброблену поверхневий шар розтягується. Межею поділу цих зон є ріжуча кромка інструменту.

2. Локалізоване нагрівання тонких поверхневих шарів внаслідок роботи деформації і тертя призводить до великих температурних напружень, що перевищують межу плинності матеріалу. Після охолодження в

поверхневому шарі з'являються значні розтягуючі залишкові напруження.

3. Вторинні фазові перетворення в поверхневих шарах призводять до утворення вторинних структур з різними питомими об'ємами.

Вплив зазначених факторів, що діють у протилежних напрямках, призводить до того, що залишкові напруження при механічній обробці істотно залежать від технологічних режимів (геометрія і стан ріжучого інструменту, охолоджуюче середовище, вид і режим обробки). Крім того, залишкові напруження в цьому випадку залежать від матеріалу виробу.

Величина залишкових напружень при механічній обробці різанням металів середньої міцності досягає 1000-1300 МПа при глибині поширення 50-200 мкм.

При шліфуванні вирішальний вплив на утворення залишкових напружень має тепловий фактор.

Величина і знак залишкових напружень при шліфуванні залежать від швидкості обертання круга і деталі, швидкості поздовжньої подачі, глибини шліфування, а також матеріалу деталі, матеріалу і зернистості круга і охолоджуючої рідини.

Величина залишкових напружень після шліфування досягає 400- 1000 МПа, а глибина їх поширення - 20-50 мкм. 1.1.6. Напруження після гартування

Утворення залишкових напружень після гартування обумовлено головним чином швидкістю охолодження. На утворення залишкових напружень впливає хімічний склад металу, умови гартування, початкова температура і швидкість охолодження, а також вихідний стан поверхневого шару.

Істотний вплив на характер і величину сумарних напружень ів має час зміни знаку теплових напружень по відношенню до часу появи структурних перетворень. Якщо структурні перетворення з'явилися до зміни знаку теплових напружень, то сумарні напруження зменшуються.

Якщо структурні перетворення відбулися після зміни знаку теплових напружень, то сумарні напруження збільшуються,

При поверхневому загартованні характер ектори залишкових напружень залежить від режиму нагрівання, глибини загартованого шару, умов охолодження, хімічного складу та вихідної структури оброблюваної сталі [15]. Варіюючи частоту струму і тепловий режим нагрівання, можна отримати різну глибину загартованого шару і різний характер розподілу залишкових напружень по глибині виробу.

Зі збільшенням кількості вуглецю стискаючі залишкові напруження в поверхневому шарі зменшуються через переважну дію структурного фактора. Біля поверхні в загартованому шарі залишкові напруження (осьові і тангенціальні) — стискаючі. Поблизу межі шару напруження різко зменшуються і переходять в розтягуючі, максимум яких розташовується на деякій відстані від межі загартованої ділянки.

Основною причиною виникнення розтягуючих залишкових напружень поблизу твердого шару є об'ємні пластичні деформації в процесі нагрівання і охолодження. Використання віброобробки для зняття залишкових напружень і стабілізації геометричних розмірів станин.

При вібростабілізуючій обробці підведена механічна енергія сприяє ігабілізації геометричної форми виробу, так як прискорює переміщення домішкових атомів, утворення атмосфер Коттрелла і блокування дислокацій.

При циклічному навантаженні напруження, що виникають у виробі, підсумовуються із залишковими і, перевищивши межу пружності, викликають пластичну деформацію, внаслідок чого зменшуються вихідні залишкові напруження. Практично повністю залишкові напруження знімаються при залишковій деформації 0,5— 1 %.

Циклічне навантаження впливає на значення залишкових напружень у разі, коли сумарні напруження перевищують межу пружності. Однак слід врахувати, що межа пружності при циклічних навантаженнях на 2() % нижча, ніж при статичних. Зміна залишкових напружень при циклічному навантаженні є наслідком релаксаційного процесу, а в деяких випадках - пружною наслідком.

Напруження релаксують в результаті підсумовування залишкових і циклічних змінних напружень. У момент збігу за знаком вібраційних і залишкових напружень відбувається короткочасне перевантаження зварних з'єднань, викликаючи в них пластичні деформації - перш за все, в ділянках концентрації напружень. Необхідною умовою є досягнення межі плинності.

При вібраційній обробці за короткі проміжки часу створюється безліч циклів навантаження на заданих і контрольованих потужностях і частотах, що забезпечує завершення стабілізації протягом нетривалого часу.

Вібростабілізація є високопродуктивним методом зниження залишкових напружень, який придатний для литих, кованих, зварних і гарячекатаних чорних і кольорових металів. При цьому параметри міцності, твердості та довговічності не знижуються. Крім того, він застосовується до конструкцій будь-яких габаритних розмірів і маси, а обладнання, необхідне для його здійснення, є простим і малогабаритним. Це дозволяє використовувати його в безперервному технологічному процесі і в проміжних — між окремими операціями механічної обробки.

Вібростабілізуюча обробка особливо ефективна, коли термічні та інші способи зняття напружень є неприйнятними, наприклад при наявності приварених направляючих, загартованих індукційним способом після зварювання, а також в конструкціях, зварених з різних металів.

Металам властиве перетворення механічної енергії (енергії коливаль) в теплову навіть при вібраційних

навантаженнях, значення яких нижче макроскопічної межі плинності. Це пояснюється тим, що справжня межа плинності в багатьох частинах виробу нижча за теоретичну, причому при більш високих пружних напруженнях настають вже мікропластичні деформації. В кінцевому підсумку вони також є причиною зниження межі плинності при розтягуванні з тривалим навантаженням.

В області дислокацій атоми знаходяться в нестійкій рівновазі, тому для їх зміщення достатньо такого дотичного напруження, яке значно нижче напруження, необхідного для зміщення дислокації поперек решітки до наступного гальмування решітки або до межі зерна. Переміщення дислокацій являє собою зміну взаємного розташування атомів. Самі атоми переміщуються при цьому на частки міжплощинної відстані решітки. Решітка не піддається додатковій пружній деформації, і, отже, відбувається незначне накопичення енергії. Рухомі разом з дислокаціями поля внутрішніх напружень набувають найбільшої стабільності на гравіці решітки і врівноважуються між собою.

Механізм вібростабілізації в локальних зонах пояснюється наступним чином: залишкові напруження утворюються в кристалічних тілах як результат пластичної деформації кристалів. Для стабілізації напруженого стану деталі повідомляється деякий енергетичний імпульс, наприклад енергія коливальних вібростабілізації. Додаткові напруження, що виникають при цьому, підсумовуються з початковими залишковими, в результаті чого в полікристалічному матеріалі відбуваються зсуви в у кристалічній решітці, які супроводжуються перерозподілом напружень, а молекули приходять в рівноважне положення. Напруження в межах зерен і по їх межах зменшуються.

Зміна властивостей металевої деталі в локальних обсягах обумовлює процеси зміцнення, що протікають при пластичній деформації металів і деформаційному старінні, характерному для залізобуглецевих сплавів. Відомо, що пружні деформації істотно прискорюють процес деформаційного старіння. Таким чином, при пластичному деформуванні відбуваються генерація дислокацій, підвищення їх щільності, що супроводжується блокуванням вільних дислокацій атомами вуглецю і азоту. Одночасно зменшуються напруження в локальних зонах, і тим помітніше, чим вищий ступінь пластичної деформації. Однак з огляду на локальність протікання процесу в зонах концентрації напружень загальний рівень напружень першого роду змінюється незначно і напруження можуть бути стабілізовані при достатньо високому їх кінцевому рівні. Важливо, щоб в мегаїллі концентрація напружень не перевищувала його релаксаційної стійкості.

Вібраційна обробка одночасно діє на напруження першого, другого і третього роду. Зміна напружень другого і третього роду в збалансованих обсягах при відсутності напружень першого роду не впливає на форму деталі. Пружними коливаннями, поширеними в металі, впливати на локальні зони можна, але ізолювати зміну напружень в цих зонах від напружень першого роду не можна.

Ефективність вібраційної обробки визначається ступенем пластичної деформації металу, яка залежить від прикладеного навантаження. При вібрації, що визначається значенням і місцем прикладання змушувальної сили, створюваної вібробудником, а також геометричною формою деталі.

Стабілізація залишкових напружень у процесі вібраційної стабілізуючої обробки досягається за рахунок поєднання вібраційних і залишкових напружень, при певних значеннях яких матеріал стає пластичним (рис. 2).

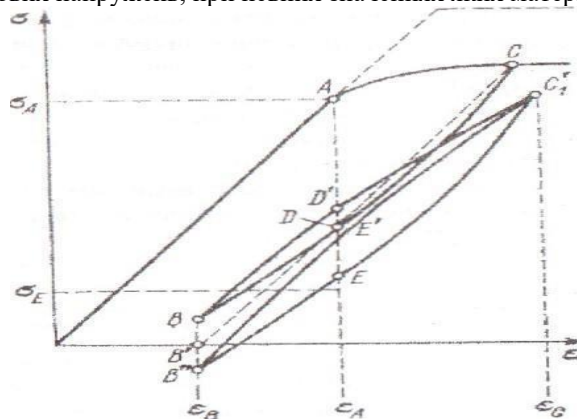


Рис. 2 – Діаграма $\sigma - \epsilon$ в процесі вібростабілізації станин важких верстатів вагою до 10000кг

Якщо в тілі, що має певні залишкові напруження, створити циклічно змінювані напруження, то процес зміни напруження для точки A може бути представлений у такому вигляді. Початковий стан характеризується напруженням σ_A і деформацією ϵ_A . Змінне навантаження здійснюється в межах $\sigma - \epsilon$.

Першому циклу навантаження відповідає ділянка графіка ACDBW. При цьому слід звернути увагу на паралельність ліній CD і пружність після зняття навантаження на всьому протязі навантаження і на невеликий спад до кінця CD — ефект Баушингера.

Наступні навантаження призводять матеріал до утворення стабільної петлі гістерезису $C_1'EB'E'C_1'$. Таким чином, якщо врахувати, що в початковому стані залишкові напруження відповідають напруженням OE, а зниження залишкових напружень дорівнює різниці

$\sigma_A - \sigma_E$, то кінцевий результат вібрації є функцією змінних напружень і характеристик

пружнопластичних властивостей матеріалу при циклічних навантаженнях.

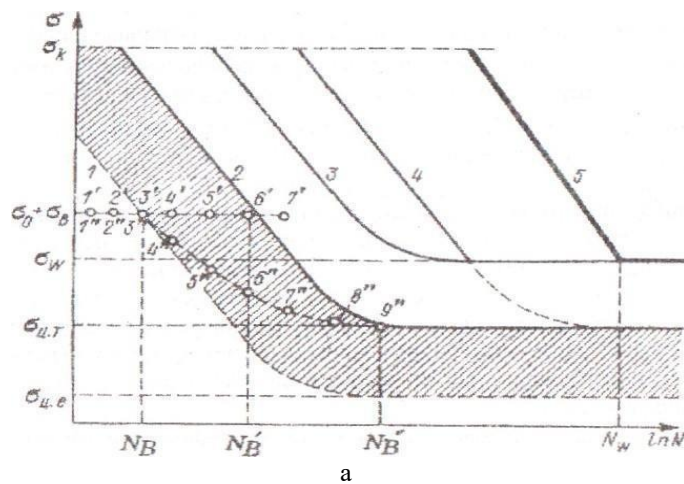
Необхідною умовою для залишкових деформацій є досягнення межі плинності при вібрації в поєднанні залишкових напружень з напруженнями, викликаними прикладанням змінних навантажень.

Межа плинності при циклічному навантаженні для деяких матеріалів може бути знижена в два рази в порівнянні з межею плинності при статичному навантаженні, в зв'язку з чим при відносно невеликих значеннях пульсуючих напружень спостерігається скорочення залишкових напружень.

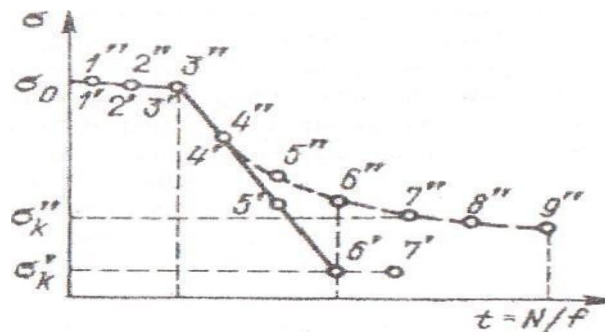
Від правильності вибору значення напруг і числа циклів навантаження залежать якість віброобробки і довговічність виробу. Крім того, природа релаксації залишкових напружень при віброобробці є циклічною і тому фізичну природу розглянутого явища пропонується проаналізувати на графіку в координатах «циклічне навантаження — число циклів» або на діаграмі втоми (рис. 1.2.) [2]. При віброобробці на стадії циклічної мікроплинності (до лінії 2) звичайні механічні властивості (межа плинності, мікротвердість та ін.) не змінюються і до її закінчення; при циклічному напруженні, рівному межі втоми, весь перетин матеріалу зазнає невеликої деформації. Експериментально встановлено, що при тривалості віброобробки не більше 10^4 циклів фіксується відносна деформація порядку 10^{-6} — 10^{-4} .

У поверхневому шарі та на межі зерен утворюється підвищена щільність дислокацій з подальшим лавиноподібним процесом протікання мікропластичної деформації спочатку в окремих зернах (з найбільшими градієнтами напружень), а потім по всьому перетину навантажуваного металу. Початок інтенсивного мікропластичного течії встановлюється за зміною характеристики внутрішнього тертя і позначено на рис. 1.2 лінією 1; області макроплинності та мікроплинності розмежовані лінією 2; лінії 3, 4 і 5 відображають відповідно стадії циклічного зміцнення, утворення субмікроскопічних тріщин і втомного руйнування.

Настання стадії циклічної макротекучості пов'язане з макроскопічним розупрочненням, тобто з різким збільшенням інтенсивності «розкриття» петлі гістерезису, хоча вже в процесі макроскопічного розупрочнення деякі обсяги зміцнюються.



а



б

Рис. 3 – Схема узагальноної діаграми втоми (а) і кінетика зменшення залишкових напружень (б):

— початок мікроскопічного течії; 2 — макроскопічне течії; 3 — закінчення мікроскопічного течії; 4 — лінія початку утворення субмікроскопічних тріщин; 5 — крива втомного руйнування; σ_k — критична напруга втоми; $\sigma_{ц.г}$ — циклічна межа плинності; — межа втоми; о — циклічна межа пружності.

Ці процеси, що відбуваються на даній стадії під впливом циклічного деформування, викликані проходженням деформації Чернова-Людерса, що свідчить про нерівномірний розвиток пластичної деформації і, отже, про нерівномірний розподіл дефектів кристалічної решітки. Смуги Чернова — Людерса можуть служити

засобом аналізу поля напружень при пластичній деформації.

У маловуглецевій сталі стадія циклічного течії пов'язана з протіканням по всьому об'єму матеріалу макроскопічної пластичної деформації, що характеризується різким збільшенням щільності дислокацій по межах зерен в перліті і навколо включень, протіканням поперечного ковзання і початком формування комірчастої дислокаційної структури. Крім того, змінюються деякі фізико-механічні властивості: підвищується мікротвердість, знижується пропорційність, відбувається зміна характеристик внутрішнього тертя, магнітних властивостей та ін. Слід зазначити, що в залежності від структурного стану матеріалу, виду навантаження, температури процесу і сили деформування в умовах циклічного навантаження з початком мікроскопічної пластичної деформації можуть спостерігатися різні зміни фізико-механічних властивостей.

Виявлені вище особливості поведінки матеріалу на різних стадіях (мікро- і макротекучесги) циклічного деформування дозволяють більш точно визначити область протікання процесу зменшення залишкових напружень, відповідну стадію циклічної мікроплинності. Процес зменшення залишкових напружень в полі сумарних залишкових і вібраційних напружень починається з лінії (початку мікроскопічного течії) і закінчується лінією 2 (початком макроскопічного течії). Сумарні значення залишкових і вібраційних напружень $\sigma_0 + \sigma_v$ повинні бути меншими за критичне напруження втоми σ_{0k} , при якому на полірованій поверхні зразка з першого циклу навантаження з'являються сліди макроскопічної деформації і виникають смуги Чернова — Людерса.

Наявність побудованих для певного матеріалу ліній 1, 2 і 3 на діаграмі втоми дозволяє обґрунтовано вибирати режими віброобробки. Розглянемо перебіг процесу вібраційного зменшення залишкових напружень при сумарному значенні залишкових напружень, меншому за статичну межу мікроплинності. Як правило, віброобробку проводять при застосуванні вібраційних напружень $\sigma_v = \text{const}$. На узагальненій діаграмі втоми (рис. 3, а) відкладаємо сумарне значення залишкових і вібраційних напружень $\sigma_0 + \sigma_v$. До початку мікроскопічного течії (лінія 1) зменшення залишкових напружень майже не відбувається. Через NB цик лов, число яких залежить від сумарного значення залишкових і вібраційних цій напружень, починається пластична деформація, внаслідок чого межові напруження зменшуються, що відповідає точкам 4" — 8" (див. рис. 3). При досягненні лінії початку макроскопічного течії (точка 9') віброобробку необхідно припинити. Точка 9" відповідає циклам, Час віброобробки визначається діленням числа циклів на частоту f впливу ($t_{0br} = n / f$).

Визначивши по осі ординат значення $\sigma_0 + \sigma_v$, що відповідає точці 9" (наприклад, $\sigma_v + \sigma_{0от}$), знайдемо значення σ_{0k} , до якого вдається знизити віброобробкою залишкові напруження.

Таким чином, завдяки нерівномірному розподілу залишкових напружень у зварних конструкціях ступінь зменшення залишкових напружень у різних точках виробу буде різним через непостійність сумарного значення залишкових і вібраційних напружень $\sigma_0 + \sigma_v$.

Можливий випадок, коли в процесі віброобробки для зменшення залишкових напружень збільшують σ_v , щоб сума залишкових і вібраційних напружень залишалася постійною: $\sigma_0 + \sigma_v = \text{const}$, внаслідок чого швидкість зменшення залишкових напружень підтримується також постійною (точки 3' — 6') і досягається найбільш повне зниження залишкових напружень. Мабуть, рівень залишкових напружень після віброобробки буде відповідати приблизно 20 % (УГ початкових σ_0). Це обумовлюється встановленням рівноваги двох процесів: анігіляції дислокацій і збільшення їх щільності шляхом генерування і подальшого гальмування дислокацій. У розглянутому випадку час віброобробки визначається числом циклів, яке значно менше часу віброобробки в попередньому випадку, що визначається числом циклів $A! v^n$. Очевидно, що при правильному виборі вібраційного впливу в процесі віброобробки можна досягти більш рівномірного зниження напруги, підвищити якість і ефективність процесу. У той же час підвищуються вимоги до часу закінчення процесу.

Таким чином, для кожного матеріалу можна вибрати прийнятні режими вібростабілізації. Очевидно, що не всі матеріали однаково можуть бути піддані вібраційній обробці з метою зменшення залишкових напружень.

Висновки.

Впровадження прогресивної вібростабілізуючої обробки забезпечує, порівняно з термічним методом, зниження витрат електроенергії (газу) більш ніж у 100 разів, скорочення технологічного циклу виробництва в 50-60 разів, підвищило в кілька разів продуктивність праці, знизило трудомісткість виготовлення і транспортні витрати в кілька разів, поліпшило умови праці і виключило забруднення навколишнього середовища. Стабілізація залишкових напружень у процесі вібраційної стабілізуючої обробки досягається за рахунок поєднання вібраційних і залишкових напружень, при певних значеннях яких матеріал стає пластичним

Список літератури

1. Хільчевський В. В. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів: Навчальний посібник. К.: Либідь, 2002. — 328 с. ISBN 966-06-0247-2
2. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство. Практикум [Текст]: [навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. за напрямом «Інж. механіка»] / В. В. Попович, А. І. Кондир, Е. І. Плешаков та ін. — Львів: Світ, 2009. — 551 с. — ISBN 978-966-603-401-7
3. Матеріалознавство [Текст]: підручник / [Дяченко С. С., Дощечкіна І. В., Мовлян А. О., Плешаков Е. І.] ; ред. С. С. Дяченко ; Харківський нац. автомобільно-дорожній ун-т. — Х. : ХНАДУ, 2007. — 440 с. — ISBN 978-

966-303-133-0

4. Будник А. Ф. Типове обладнання термічних цехів та дільниць: Навчальний посібник. — Суми: Вид-во СумДУ, 2008. — 212 с. ISBN 978-966-657-185-7
5. Бучинський М. Я., Горик О. В., Чернявський А. М., Яхін С. В. ОСНОВИ ТВОРЕННЯ МАШИН / [За редакцією О. В. Горика, доктора технічних наук, професора, заслуженого працівника народної освіти України]. — Харків: Вид-во «НТМТ», 2017. — 448 с. : 52 іл. ISBN 978-966-2989-39-7
6. Термічна обробка // Термінологічний словник-довідник з будівництва та архітектури / Р. А. Шмиг, В. М. Боярчук, І. М. Добрянський, В. М. Барабаш ; за заг. ред. Р. А. Шмига. — Львів, 2010. — С. 190. — ISBN 978-966-7407-83-4.
7. Вибростабилизирующая обработка крупногабаритных зубчатых колес / Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, В. Д. Ковалев [и др.] // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сб. науч. тр. — Краматорск : ДГМА, 2009. — Вып. 25. — С. 90–94.
8. Технологические условия обеспечения стабилизации процесса формообразования зубчатых реек / А.А. Клочко, Н.Р. Веселовская, И.А. Билан., Д.В. Евсейчик, Е.В. Перминов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб.наук. пр. — Краматорськ : ДДМА, 2016. — Вип. 39. — С. 117–124.
9. Литвинов В.М. Технологические особенности спрерной закалки крупногабаритных зубчатых колес в тяжелом машиностроении / В.М. Литвинов, Е.В. Мироненко, А.Н. Шелковой, М.И. Гасанов, А.А. Клочко // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. — Краматорск : ДГМА, 2016. — Вып. 38. — С. 51–59.
10. Литвинов В.М. Унікальна технологія ручної кислородної різки заготовок из углеродистых, высоколегированных сталей и чугуна толщиной до 1000 мм в условиях предприятий тяжелого машиностроения с учетом конструктивных особенностей ручного резака / В.М. Литвинов, А.А. Клочко, А. Н. Лищенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. — Х.: НТУ «ХП», 2016. — №5 (1177). С. 110-115. — Бібліогр.: 6 назв. — ISSN 2079-004X
11. Пермяков О.А., Клочко О.О., Веселовська Н.Р., Синиця Ю.О. Технологічне забезпечення підвищення параметрів точності та якості зубчастих рейок важких верстатів з ЧПК. // Вісник Національного технічного університету «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». — Харків : НТУ «ХП», 2018. — № 6 (1282) 2018. — С. 72–77. — ISSN 2079-004X.
12. Перминов С.В., Клочко О.О. Технологічне забезпечення точності та довговічності зубчастих передач приводів верстатів // XII Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів (17–20 квітня 2018 року): матеріали конференції: у 3-х ч. — Ч. 3 / за ред. проф. Є.І. Сокола. — Харків : НТУ «ХП», 2018. — С. 206. ISBN 978-617-05-0264-3 (повне вид.) ISBN 978-617-05-0267-4 (ч. 3).
13. Ковальов В.Д., Гасанов М.І., Клочко О.О., Васильченко Я.В., Шаповалов М.В. Критерії формування структур і параметрів систем обробки, що забезпечують задані експлуатаційні властивості зубчастих коліс, які зношуються і відновлюватимуться. Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції 21 – 24 грудня 2020 року / За заг. ред. В. Д. Ковальова. — Краматорськ: ДДМА, 2020. — С. 51 – 52. ISBN 978-966-379-959-9.
14. Предпосылки управления технологическими процессами с использованием искусственных нейронных сетей. Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції 21 – 24 грудня 2020 року / За заг. ред. В. Д. Ковальова. — Краматорськ: ДДМА, 2020. — С. 80. ISBN 978-966-379-959-9.
15. Равська Н.С., Корбут Є.В., Івановський О.А., Родин Р.П., Парненко В.С., Заковоротний О.Ю., Клочко О.О., Сапон С.П., Rolahd Logosh. Модифікований спрощений алгоритм методу групового врахування аргументів в імітаційному моделюванні процесами. Збірник наукових праць XI Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент», 5–6 листопада 2021 року. — Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка», 2021. — С. 48 –50.
16. С.В. Артьомова. Термічна обробка і властивості литої складнопрофільної лопаті гідротурбіни / С.В. Артьомова, О.І. Пономаренко, О.С.Бударін, В.С. Бондаренко, О.М. Безвесільна, А.П. Марченко, О.В. Акімов.// Металознавство та обробка металів. –2022. – № 28 (102). – С. 58-63. <https://doi.org/10.15407/mom2022.02.058>

References (transliterated):

1. Khilchevskiy V. V. Materialoznavstvo i tekhnolohiia konstruktsiinykh materialiv: Navchalnyi posibnyk. K.: Lybid, 2002. — 328 s. ISBN 966-06-0247-2
2. Tekhnolohiia konstruktsiinykh materialiv i materialoznavstvo. Praktikum [Tekst]: [navch. posib. dlia stud. vyshch. navch. zakl. za napriamom «Inzh. mekhanika»] / V. V. Popovych, A. I. Kondyr, E. I. Pleshakov ta in. — Lviv: Svit, 2009. — 551 s. — ISBN 978-966-603-401-7
3. Materialoznavstvo [Tekst]: pidruchnyk / [Diachenko S. S., Doshchekina I. V., Movlian A. O., Pleshakov E. I.] ; red. S. S. Diachenko ; Kharkivskiy nats. avtomobilno-dorozhniy un-t. — Kh. : KhNADU, 2007. — 440 s. — ISBN 978-966-303-133-0
4. Budnyk A. F. Typove obladnannia termichnykh tsekhiv ta dilnyts: Navchalnyi posibnyk. — Sumy: Vyd-vo

SumDU, 2008. — 212 s. ISBN 978-966-657-185-7

5. Buchynskiy M. Ya., Horyk O. V., Cherniavskiy A. M., Yakhin S. V. OSNOVY TVORENNIA MASHYN / [Za redaktsiieiu O. V. Horyka, doktora tekhnichnykh nauk, profesora, zasluženoho pratsivnyka narodnoi osvity Ukrainy]. — Kharkiv: Vyd-vo «NTMT», 2017. — 448 s. : 52 il. ISBN 978-966-2989-39-7

6. Termichna obrobka // Terminolohichni slovnyk-dovidnyk z budivnytstva ta arkhitektury / R. A. Shmyh, V. M. Boiarchuk, I. M. Dobrianskyi, V. M. Barabash ; za zah. red. R. A. Shmyha. — Lviv, 2010. — S. 190. — ISBN 978-966-7407-83-4.

7. Vybrostablyzyruishchaia obrabotka krupnohabarytnykh zubchatykh koles / E. V. Myronenko, A. A. Klochko, V. D. Kovalev [y dr.] // Nadezhnost ynstrumenta y optymizatsiia tekhnolohycheskykh system: sb. nauch. tr. — Kramatorsk : DHMA, 2009. — Выр. 25. — S. 90–94.

8. Tekhnolohycheskye uslovyia obespecheniia stablyzatsyy protsessa formoobrazovaniia zubchatykh reek / A.A. Klochko, N.R. Veselovskaia, Y.A. Bylan., D.V. Evseichyk, E.V. Permynov // Nadiinist instrumentu ta optymizatsiia tekhnolohichnykh system: zb.nauk. pr. — Kramatorsk : DDMA, 2016. — Выр. 39. — S. 117–124.

9. Lytvynov V.M. Tekhnolohycheskye osobennosti spreernoi zakalky krupnohabarytnykh zubchatykh koles v tiazhelom mashynostroenyy / V.M. Lytvynov, E.V. Myronenko, A.N. Shelkovoii, M.Y. Hasanov, A.A. Klochko // Nadezhnost ynstrumenta y optymizatsiia tekhnolohycheskykh system : sb. nauch. tr. — Kramatorsk : DHMA, 2016. — Выр. 38. — S. 51–59.

10. Lytvynov V.M. Unykalnaia tekhnolohiia ruchnoi kyslorodnoi rezky zahotovok yz ughlerodystykh, vysokoleghirovannykh stalei y chuhuna tolshchynoi do 1000 mm v uslovyiakh predpriiaty tiazheloho mashynostroeniia s uchetom konstruktivnykh osobennosti ruchnoho rezaka / V.M. Lytvynov, A.A. Klochko, A. N. Lyshenko // Visnyk NTU «KhPI». Serii: Tekhnolohii v mashynobuduvanni. — Kh.: NTU «KhPI», 2016. — №5 (1177). S. 110-115. — Bibliohr.: 6 nazv. — ISSN 2079-004X

11. Permiakov O.A., Klochko O.O., Veselovska N.R., Synytsia Yu.O. Tekhnolohichne zabezpechennia pidvyschennia parametriv tochnosti ta yakosti zubchastykh reioik vazhkykh verstativ z ChPK. // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Tekhnolohii v mashynobuduvanni = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: zb. nauk. pr. / Nats. tekhn. un-t «Kharkiv. politekhn. in-t». — Kharkiv : NTU «KhPI», 2018. — № 6 (1282) 2018. — S. 72–77. — ISSN 2079-004Kh.

12. Perminov Ye.V., Klochko O.O. Tekhnolohichne zabezpechennia tochnosti ta dovhovichnosti zubchastykh peredach pryvodiv verstativ // KhII Mizhnarodna naukovopraktychna konferentsiia mahistrantiv ta aspirantiv (17–20 kvitnia 2018 roku): materialy konferentsii: u 3-kh ch. — Ch. 3 / za red. prof. Ye.I. Sokola. — Kharkiv : NTU «KhPI», 2018. — S. 206. ISBN 978-617-05-0264-3 (povne vyd.) ISBN 978-617-05-0267-4 (ch. 3).

13. Kovalov V.D., Hasanov M.I., Klochko O.O., Vasylichenko Ya.V., Shapovalov M.V. Kryterii formuvanniia struktur i parametriv system obrobky, shcho zabezpechiut zadani ekspluatatsiini vlastyvoli zubchastykh kolis, yaki znoshuiutsia i vidnovliuvatymutsia. Vazhke mashynobuduvanniia. Problemy ta perspektyvy rozvytku. Materialy Mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii 21 – 24 hrudnia 2020 roku / Za zah. red. V. D. Kovalova. — Kramatorsk: DDMA, 2020. — S. 51 – 52. ISBN 978-966-379-959-9.

14. Predposylky upravleniia tekhnolohycheskymy protsessamy s yspolzovanyem yskusstvennykh neironnykh setei. Vazhke mashynobuduvanniia. Problemy ta perspektyvy rozvytku. Materialy Mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii 21 – 24 hrudnia 2020 roku / Za zah. red. V. D. Kovalova. — Kramatorsk: DDMA, 2020. — S. 80. ISBN 978-966-379-959-9.

15. Ravska N.S., Korbut Ye.V., Ivanovskiy O.A., Rodyn R.P., Parnenko V.S., Zakovorotnyi O.Iu., Klochko O.O., Sapon S.P., Rolahd Lorooh. Modyfikovani sprosycheni alhorytm metodu hrupovoho vrakhuvanni arhumentiv v imitatsiinomu modeliuvanni protsesamy. Zbirnyk naukovykh prats KhI Vseukrainskoi naukovopraktychnoi konferentsii z mizhnarodnoiu uchastiu «Protsey mekhanichnoi obrobky, verstaty ta instrument», 5–6 lystopada 2021 roku. — Zhytomyr : Derzhavnyi universytet «Zhytomyrska politekhnika», 2021. — S. 48 –50.

16. S.V. Artomova. Termichna obrobka i vlastyvoli lytoi skladnoprofilnoi lopati hidroturbiny / S.V. Artomova, O.I. Ponomarenko, O.S. Budarin, V.S. Bondarenko, O.M. Bezvesilna, A.P. Marchenko, O.V. Akimov. // Metaloznavstvo ta obrobka metaliv. —2022. — № 28 (102). — S. 58-63. <https://doi.org/10.15407/mom2022.02.058>

Надійшла (received) 10.10.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Старченко Віталій Валерійович (Vitaly Starchenko) – аспірант кафедри інтегрованих технологій машинобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; e-mail: pern_a@i.ua, ORCID: 0000-0003-2843-6108

Камчатна-Степанова Катерина Валеріївна (Kamchatna-Stepanova Kateryna) – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технологій машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; e-mail: katerina.ks@i.ua, ORCID: 0000-0001-7825-1238

Главчева Юлія Миколаївна (Hlavcheva Yuliia) – PhD, директор науково-технічної бібліотеки Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; вул. Кирпичова, 2, Україна, e-mail: yuliia.hlavcheva@khpri.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0001-7991-5411>

Волошкіна Ірина Віталіївна (Voloshkina Iryna) - завідувачка навчальною лабораторією, доктор філософії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф.Семка, м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6735-2578>; mob.:0972992901; e-mail: voloshkina.irina1@gmail.com

Клочко Лариса Владимировна (Klochko Larisa) – методист вищої категорії відділу забезпечення якості освітньої діяльності, Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; тел.:+38096-8295602, e-mail: klochko1971@gmail.com, ORCID: 0009-0006-1488-0709

Волошкін Микита Дмитрович (Voloshkin Mykyta) - здобувач першого (бакалаврського) рівня вищої освіти, Харківський національний університет радіоелектроніки, факультет інформаційних радіотехнологій і медіаінженерії, кафедра медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем, м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5111-5264> ;mob.:0972992085; e-mail: mykyta.voloshkin.2007@gmail.com