

Лекція 7. Контактні умови збірок

Методичні засади лекції

📌 Під час підготовки лекції використовувались інструменти штучного інтелекту для допомоги у формулюванні та структуризації матеріалу. Весь зміст був перевірений та відредагований автором лекції.

Розділ 1. Основні відомості про контактні умови та їх ієрархічні рівні ^[1]

⚡ Важливо зазначити, що у 2020 SolidWorks змінив термінологію ^[2], що стосується контактних умов. Зокрема:

Термін **Contact** з 2021 називається **Interaction**,

No Penetration з 2021 називається **Contact**,

Allow Penetration з 2021 називається **Free**,

Функція **Compatible mesh** з 2021 називається **enforce common nodes across touching boundaries**,

Contact Visualization Plot тепер називається **Interaction Viewer**.

Детальніше в таблиці нижче

Таблиця 1.

Відповідності термінів

До 2021	Від 2021	Зміст
Global Contact	Global Interaction	Глобальна взаємодія
Component Contact	Component Interaction	По-компонентна взаємодія
Contact Set	Local Interaction	Локальна взаємодія
No Penetration	Contact	Непроникнення
Allow Penetration	Free	Без обмежень
Compatible mesh	Enforce common nodes	Сумісна сітка
Contact Visualization Plot	Interaction Viewer	Екран візуалізації контактних умов

У SolidWorks контактні умови можна задавати на різних ієрархічних рівнях:

- для всієї збірки (**Global contact**);
- для окремих компонентів (**Component contact**);
- локально для конкретних поверхонь або ребер (**Local contact set**).

Global contact

Глобальний контакт діє як правило “за замовчуванням” для всієї моделі там, де немає точніших визначень на рівнях ієрархії **Component contact** та **Local contact set**. Глобальний контакт за замовчуванням це швидко і зручно для зварних деталей (наприклад, для зварного напівкорпусу редуктора, який показаний на рис.1).

На даному ієрархічному рівні доступні наступні типи контактних умов:

- **Contact** - контакт
- **Bonded** - жорстке з’єднання
- **Free** - вільно

Component contact

Компонентний контакт задається між вибраними деталями або тілами. Це проміжний рівень деталізації між “усе з усім” і “локально по гранях, ребрах або вершинах”. Він корисний, коли поведінка між конкретними деталями відрізняється від глобального правила (яке задано в Global contact). На даному ієрархічному рівні доступні типи контактних умов аналогічні Global contact

Local contact set

Локальні контактні набори дозволяють точно вказати, **які саме грані, ребра або вершини** взаємодіють.

На даному ієрархічному рівні доступно найбільше типів контактів, зокрема:

- **Contact** - контакт
- **Bonded** - жорстке з’єднання
- **Free** - вільно
- **Shrink Fit** - посадка з натягом
- **Virtual Wall** - віртуальна стінка

 **Потрібно чітко розділяти наступні поняття:**

1. **Ієрархічні рівні** - це рівні декомпозиції збірки (глобальний, контакт компонентів та локальний), де для кожного рівня декомпозиції можуть бути встановлені правила взаємодії геометричних елементів між собою (наприклад, на рис.1 показано, що на рівні **Global contact** встановлений типу контакту **Bonded** у варіації **Surface to Surface**);
2. **Типи контактів** - це ідеалізована форма відображення фізики реального контакту в конструкції (наприклад, посадка з натягом чи без натягу). Одні і ті самі типи контактів можуть бути застосовані на різних рівнях ієрархії

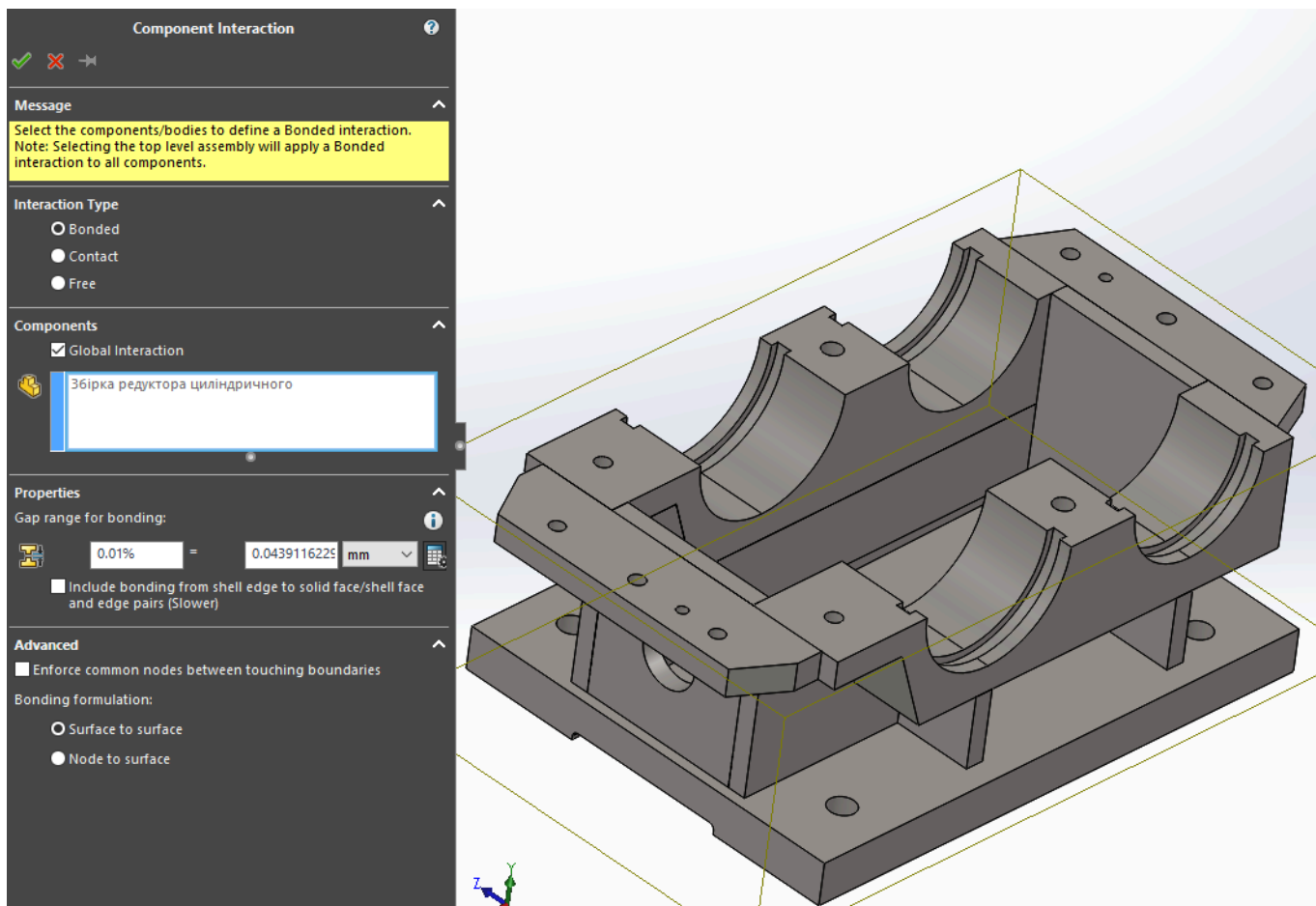
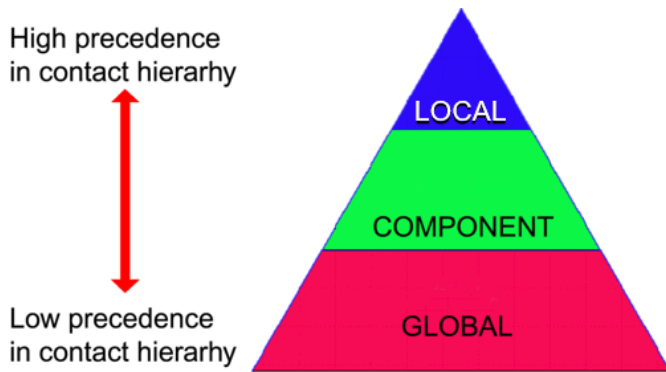


Рис.1 Глобальні контактні умови для зварного напівкорпусу редуктора

💡 Якщо одна й та сама геометрія входить одночасно до кількох контактних визначень, система застосовує ієрархію пріоритетів. Локально заданий контакт має вищий пріоритет, ніж глобально заданий (див.рис.2).



В джерелі [3] зазначено, що фактично будь-який локальний контакт (**Local contact**), заданий для грані, ребрі чи вершини, перекриває будь-який інший тип контакту (має пріоритет над **Component contact** та **Global contact**). Контакт, заданий на рівні компонента (**Component contact** або з 2020 - **Component Interaction**), має вищий пріоритет, ніж глобальний контакт. Глобальний контакт сам нічого не перекриває, а використовується як контакт за замовчуванням між усіма дотичними гранями (зазвичай типу bonded - див. рис.1.).

В джерелі [3-1] показано набір контактів для багатотільної деталі (контактні умови мають бути визначені для збірок і багатотільних деталей також в низці випадків) шляхом застосування інструменту візуалізації контактних умов (див. рис.3)

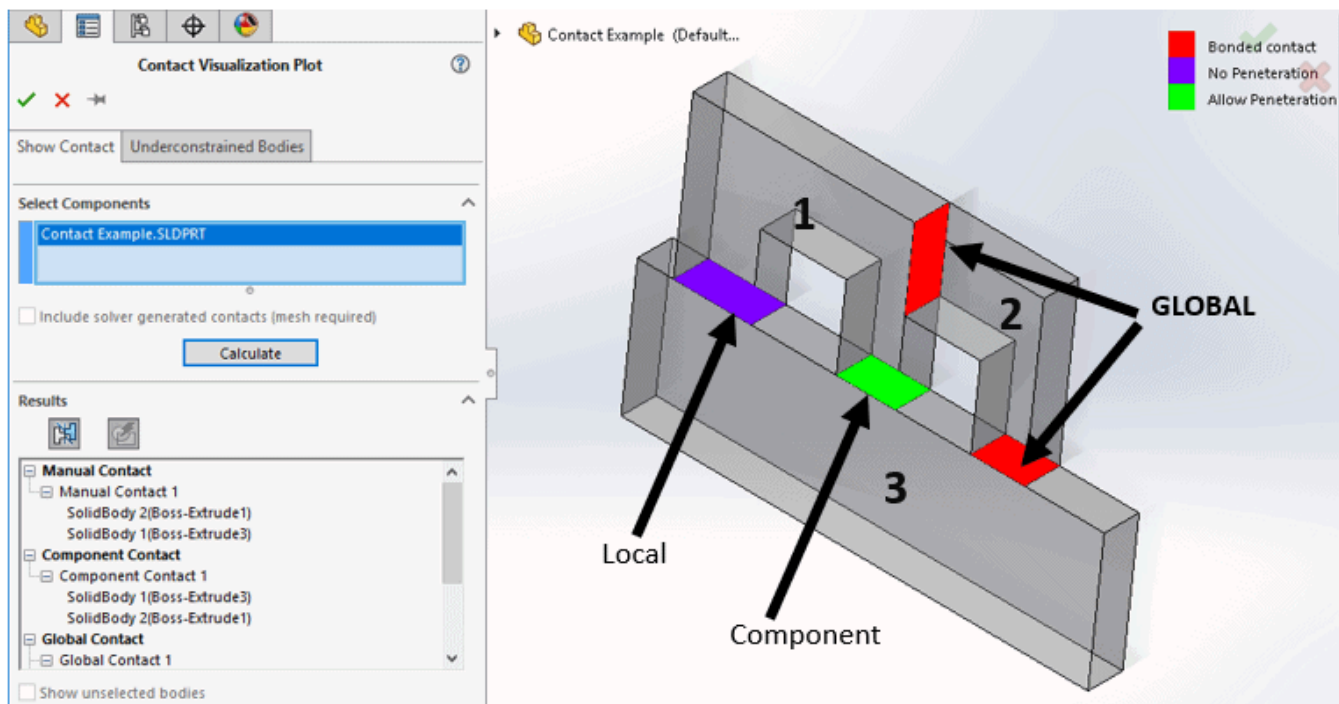


Рис.3. Екран візуалізації контактних умов

Як виходить з рис.3., **Global contact** залишився тільки там, де розробником не були визначені інші контактні умови.

****Розділ 2. Типи контактів у SOLIDWORKS Simulation**

1. Bonded [4]

Фізичний зміст: поверхні після контакту працюють ніби як одне ціле (наче як зварені) відносно переміщення між ними не допускається. Це наближено відповідає абсолютно жорсткому клею, зварюванню тощо. У SOLIDWORKS для bonded-контакту доступні варіанти сумісної та несумісної сітки, залежно від постановки.

❗ Можна сказати, що **Bonded** - це не зовсім “контакт”, а жорстке зв’язування ступенів свободи між поверхнями.

Сітка не обов’язково повинна бути сумісною. Якщо сітка є сумісною (див.рис.4), програма об’єднує вузли, що збігаються, уздовж межі поділу; в іншому разі вона внутрішньо застосовує рівняння зв’язку, щоб змодельовати жорстке з’єднання [4-1].

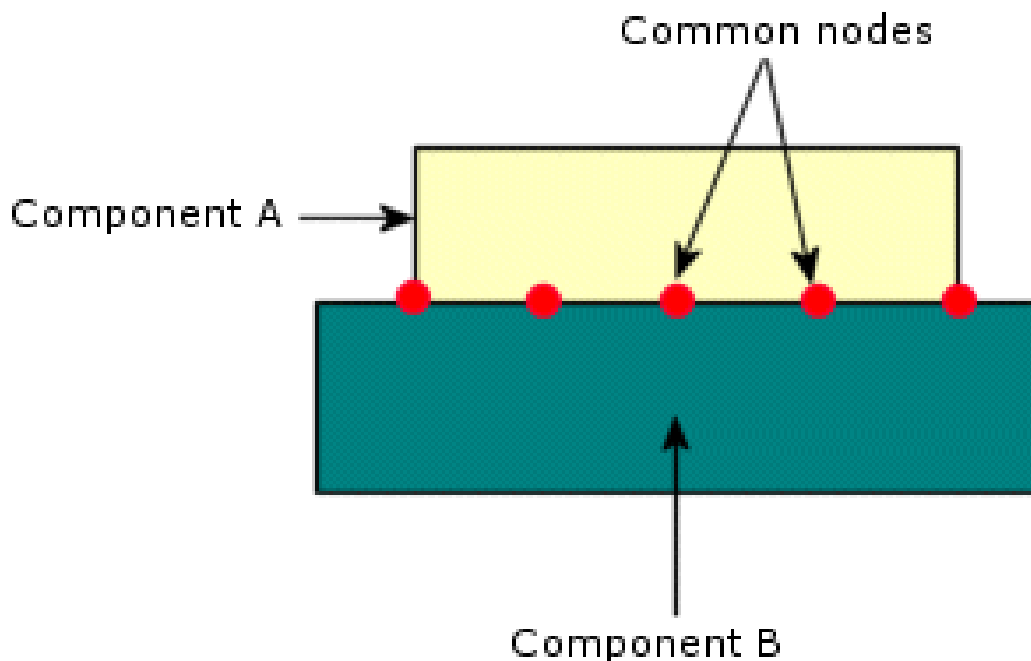
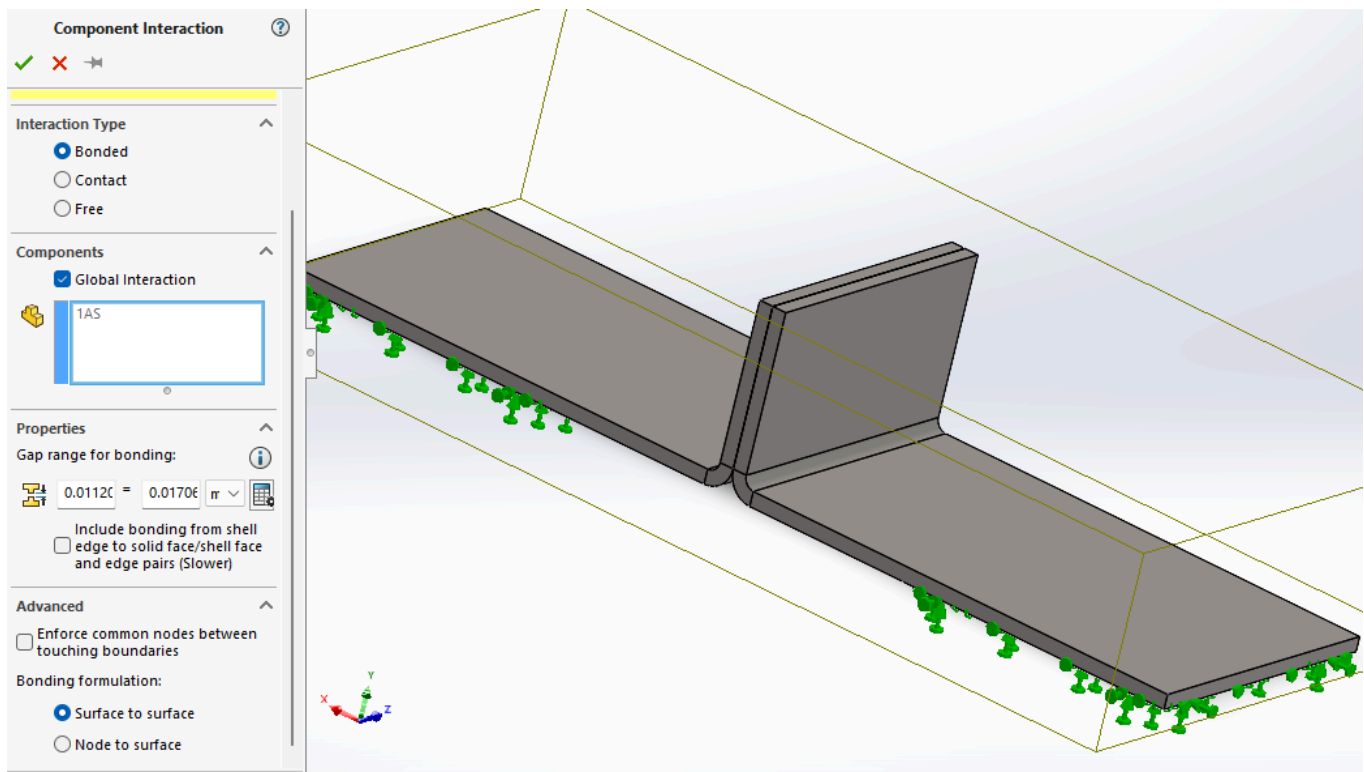


Рис.4. Схематичне зображення жорстко зв’язаного контакту при сумісній сітці [4-2]

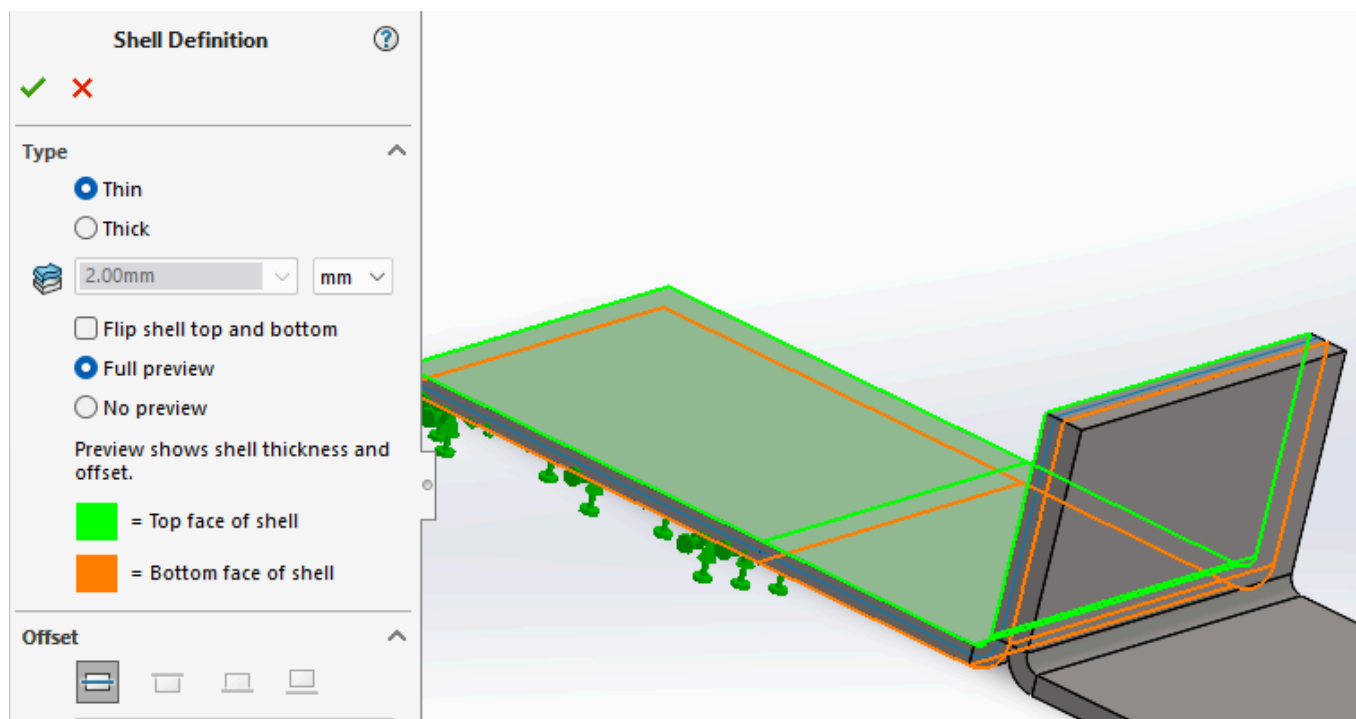
⚡ Важлива інформація щодо жорстко зв’язаного контакту (**Bonded**) між деталями з листового металу та іншими поверхнями.

В офіційній довідці SOLIDWORKS [4-3] сказано, що у разі жорстко зв'язаного контакту (**Bonded**) між деталями з листового металу та іншими поверхнями (**твердими тілами або оболонками**) алгоритм зв'язку може призводити до **надмірного підвищення жорсткості моделі** через наявність зазору між сіткою серединної поверхні та реальною геометрією контактної поверхні. Таке **штучне завищення жорсткості** спотворює розрахунок **мод вільного руху твердого тіла**. Програма коректно обчислить усі такі моди (з частотами, близькими до нуля), якщо усунути зазор шляхом **зміщення сітки деталей з листового металу із серединної поверхні безпосередньо на геометрію контактної поверхні**

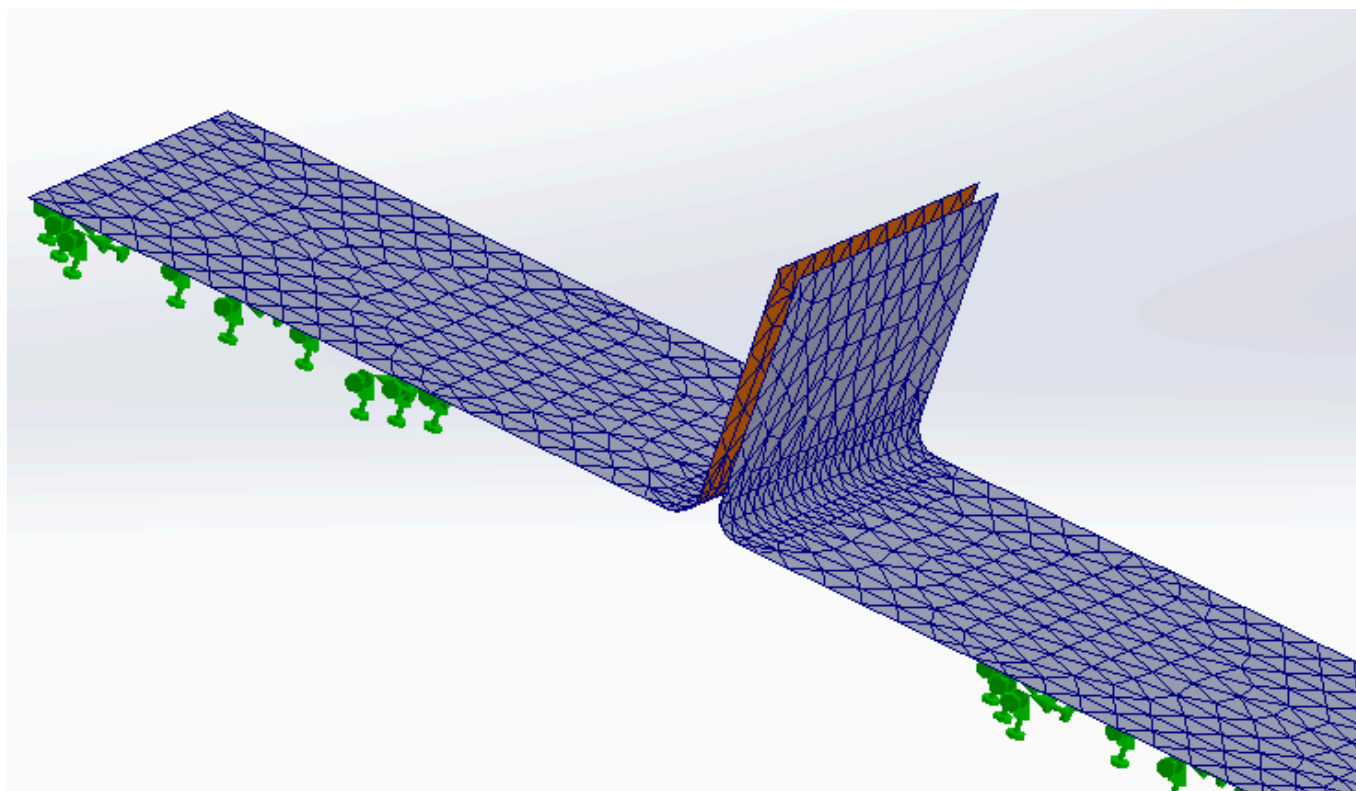
Для ілюстрації вищезазначеного наведено рис. 5



а



б



в

Рис. 5. Ілюстрація реалізації контакту **Bonded** між 2 деталями із листового металу, що дискредитуються оболонковими скінченими елементами: а - встановлення контакту **Bonded**; б - визначення оболонки; в - сітка на основі серединної поверхні

🌀 Якщо реальний вузол допускає мікросковзання, зазор, посадку з натягом або одnobічне передавання навантаження, то застосування bonded може

завищити жорсткість і занизити локальні переміщення. Тому bonded не слід автоматично призначати всім дотичним поверхням лише тому, що модель “так краще рахується”

2. No Penetration / Contact

Фізичний зміст.

Контакт **No Penetration / Contact** забороняє взаємне проникнення тіл, але при цьому допускає зміну площі контакту, локальне розкриття, а в загальному випадку - ковзання вздовж поверхні. У документації SOLIDWORKS цей тип призначений для статичних, нелінійних і drop test постановок.

Саме цей тип найближчий до класичного розуміння механічного контакту:

- деталі можуть **натискати одна на одну**;
- можуть **відриватися**, якщо стиск зникає;
- можуть **перерозподіляти контактну пляму** в процесі навантаження.

Коли застосовувати.

No Penetration / Contact потрібен для моделювання

- опорних стиків;
- поверхонь, що контактують (наприклад корпус і кришки редуктора);
- болтових і фланцевих з'єднань;
- посадок без натягу;
- задач, де важливий **контактний тиск** або можливість **роз'єднання** поверхонь.

⚡ Застереження щодо задач із зміною площі контакту.

Якщо в процесі навантаження (або розвантаження) досліджуваного об'єкта змінюється площа контакту між деталями (або тілами) - це вже **нелінійна** постановка. Через це контактні задачі зазвичай чутливі до сітки, початкового положення деталей, зазорів і параметрів солвера

3. Allow Penetration / Free

Фізичний зміст: взаємодія між тілами не враховується взагалі. Тобто, між вибраними компонентами (або гранями) **немає жодних обмежень** на відносний рух:

- тіла можуть вільно перетинатися (intersect/penetrate);

- відсутні сили контакту, тиск або тертя;
 - у теплових розрахунках **немає теплопередачі** між ними.
- Солвер просто ігнорує геометричне перетинання тіл.

Це корисно або для ділянок, де контакт неважливий, або як технічне спрощення при налагодженні моделі.

❗ Коли доцільно застосовувати **Allow Penetration / Free**

1. Наприклад, коли є велика збірка, але певна пара деталей у конкретній задачі не передає навантаження і не повинна впливати одна на одну. Тоді замість contact/no penetration можна задати **Free**, щоб не ускладнювати задачу без потреби.
2. Інколи це застосовують в **частотному** дослідженні та у дослідженні на втрату **втрату стійкості**

В цілому із візуальним поясненням контактних умов **Bonded**, **No Penetration / Contact** та **Allow Penetration / Free** можна ознайомитися на рис.6.

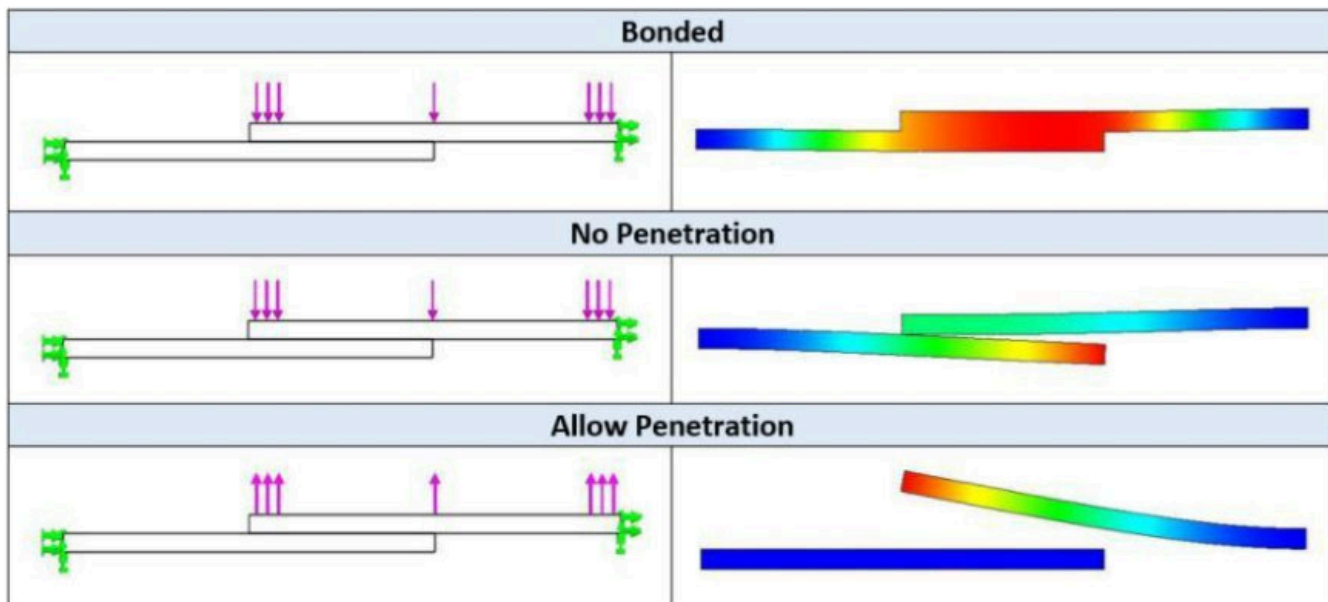


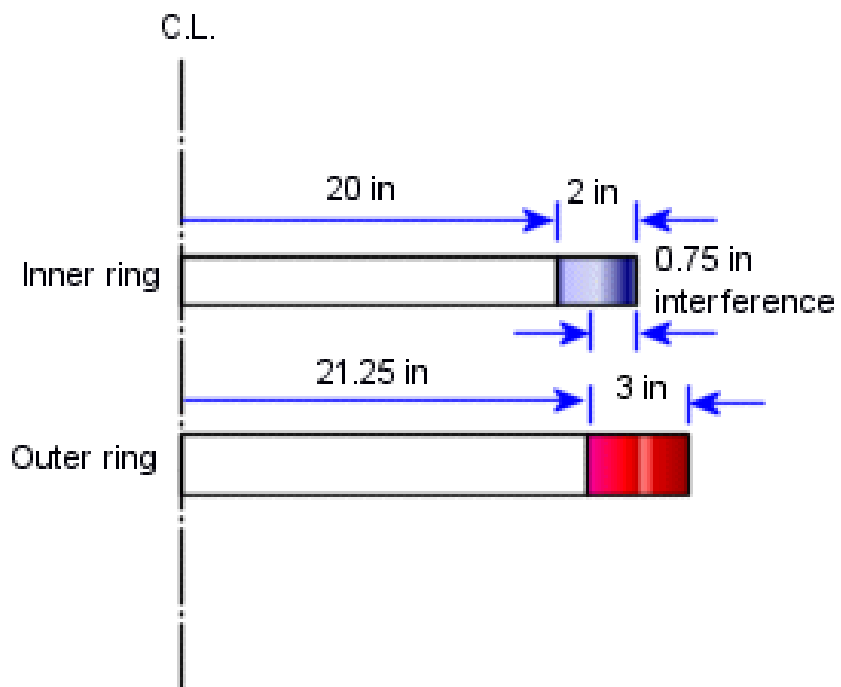
Рис.6. Візуальне пояснення контактних умов

4. Shrink Fit

Фізичний зміст: це з'єднання з попереднім натягом (посадка з натягом). Така ситуація має місце коли коли дві деталі **спочатку мають інтерференцію** за рахунок чого після складання створюють **контактний тиск** ще до прикладання **зовнішнього навантаження**. У довідці SOLIDWORKS прямо вказано, що Shrink Fit задається для двох

об'єктів, поверхні яких **початково інтерферують**, а такий тип контактних умов тип доступний для **static** і **nonlinear** studies.

Графічна візуалізації такої посадки для 2-х кілець показана на рис.7.



Математично - це **одностороннє обмеження**: тіло (грань деталі) не може перейти через площину, але може від неї відокремитись. Це принципово відрізняє Virtual Wall від низки кріплень. Незважаючи на те, що задається Virtual Wall через Contact Sets, вона автоматично з'являється в дереві симуляції як fixture.

Приклад формування контактної умови Virtual Wall показаний на рис.8.

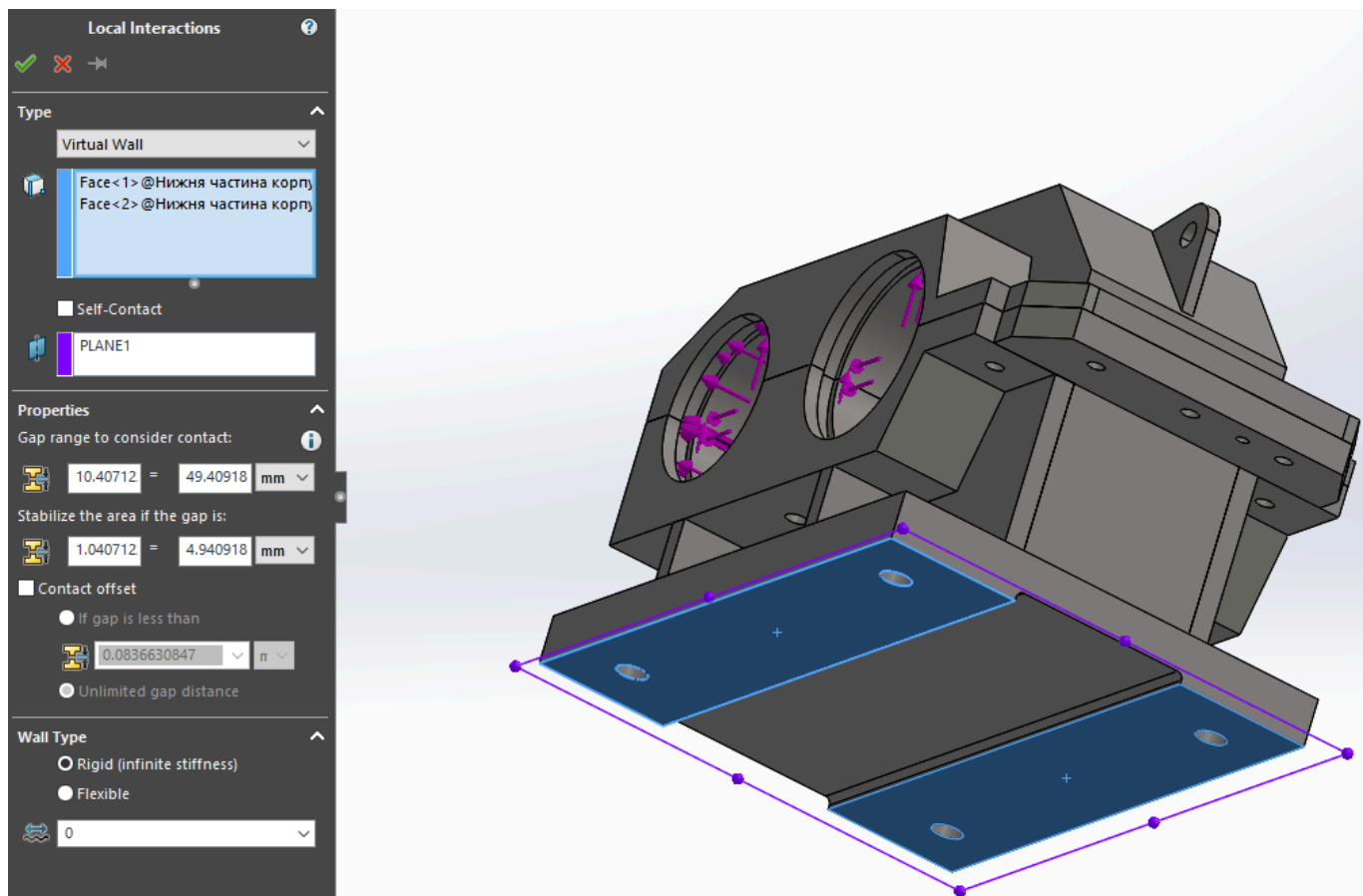


Рис. 8. Формування контактної умови Virtual Wall

Додаткові налаштування контактних умов

Friction (тертя) у Contact

Фізичний зміст. Тертя моделюється за **законом Кулона** (Coulomb friction model): тангенціальна сила тертя

$$\mu$$

де - нормальна контактна сила,

μ - коефіцієнт тертя.

Поки сила не перевищує границю — відбувається **зчеплення** (stick, без ковзання). При перевищенні - **ковзання** (slip) з силою тертя

$$= \mu$$

У SOLIDWORKS Simulation тертя враховується тільки при типі взаємодії **Contact** (No Penetration), де задається тільки на ієрархічному рівні **Local Interaction** (див.рис.9):

1. Connections → Local Interaction.
2. Interaction Type → **Contact**.

3. У розділі **Properties** з'являється поле **Friction coefficient** (μ).

- За замовчуванням $\mu = 0$ (тертя вимкнено).
- Вводиться одне значення (статичне).

Local Interactions

✓ ✗ ↔

The physical gap between the bonded entities may produce incorrect results.

Type

Contact

Face<1> @Кришка редуктора
Face<2> @Кришка редуктора
Face<3> @Кришка редуктора
Face<4> @Кришка редуктора

☐ Self-Contact

Face<5> @Нижня частина
Face<6> @Нижня частина
Face<7> @Нижня частина
Face<8> @Нижня частина
Face<9> @Нижня частина

Properties

Gap range to consider contact:

10.0048 = 47.4992 mm

Stabilize the area if the gap is:

1.00048 = 4.74992 mm

☐ Coefficient of friction 0.05

☐ Contact offset

☐ If gap is less than 0.0836097197 π

☐ Unlimited gap distance

Advanced

Contact formulation:

☐ Surface to surface

☐ Node to surface

Component Interaction

✓ ✗ ↔

Message

Select the components/bodies to define a Bonded interaction. Note: Selecting the top level assembly will apply a Bonded interaction to all components.

Interaction Type

☐ Bonded

☐ Contact

☐ Free

Components

☒ Global Interaction

Корпус збірка

Properties

Gap range for bonding:

0.010004 = 0.047495 mm

☐ Include bonding from shell edge to solid face/shell face and edge pairs (Slower)

Advanced

☐ Enforce common nodes between touching boundaries

Bonding formulation:

☐ Surface to surface

☐ Node to surface

а	б
---	---

Опція тертя доступна також для **Shrink Fit** та в Drop Test studies.

Static vs Dynamic (кінетичне) тертя У SOLIDWORKS Simulation (на відміну від SOLIDWORKS Motion) задається **один коефіцієнт** - статичний μ_s . При переході до ковзання солвер використовує той самий μ як кінетичний $\mu_k = \mu_s$. Окремі значення μ_s і μ_k підтримуються в базовому Contact.

⚡ Важливо зазначити

При $\mu > 0,3$ часто виникають **convergence issues** (солвер не сходяться, “increment too large”). Тертя сильно збільшує час розрахунку та чутливість до сітки.

Рекомендації: можна починати з $\mu = 0$, потім поступово підвищувати. У Nonlinear використовувати стабілізацію (Stabilization) або зменшувати крок навантаження. Якщо тертя не критичне - краще взагалі його вимкнути (див. рис. 9, а).

Примусове створення спільних вузлів на межах дотику (Enforce common nodes between touching boundaries)

Фізичний зміст. Цей параметр примусово створює **спільні вузли** (common nodes) на межах дотику граней/ребер для **Bonded**-взаємодії (див. рис.10 та рис.11). Завдяки цьому тіла поведуться як єдине ціле:

- забезпечується **безперервність** переміщень і напружень;
- навантаження передається без додаткових рівнянь зв'язку;
- результат - точніші напруження та переміщення на межі.

Без увімкнення опції сітка може бути **незалежною** (independent mesh) - вузли сітки не збігаються, а SOLIDWORKS внутрішньо застосовує **Bonding formulation** (рівняння зв'язку степенів свободи). Це працює, але трохи менш точно і повільніше.

Advanced 

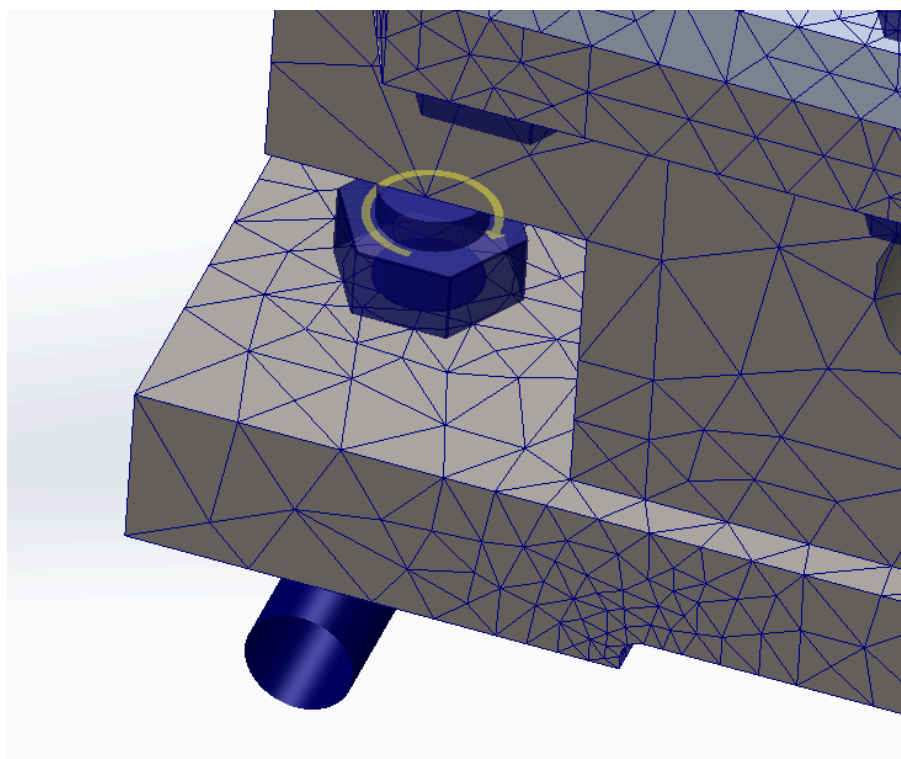
☐ Enforce common nodes between touching boundaries

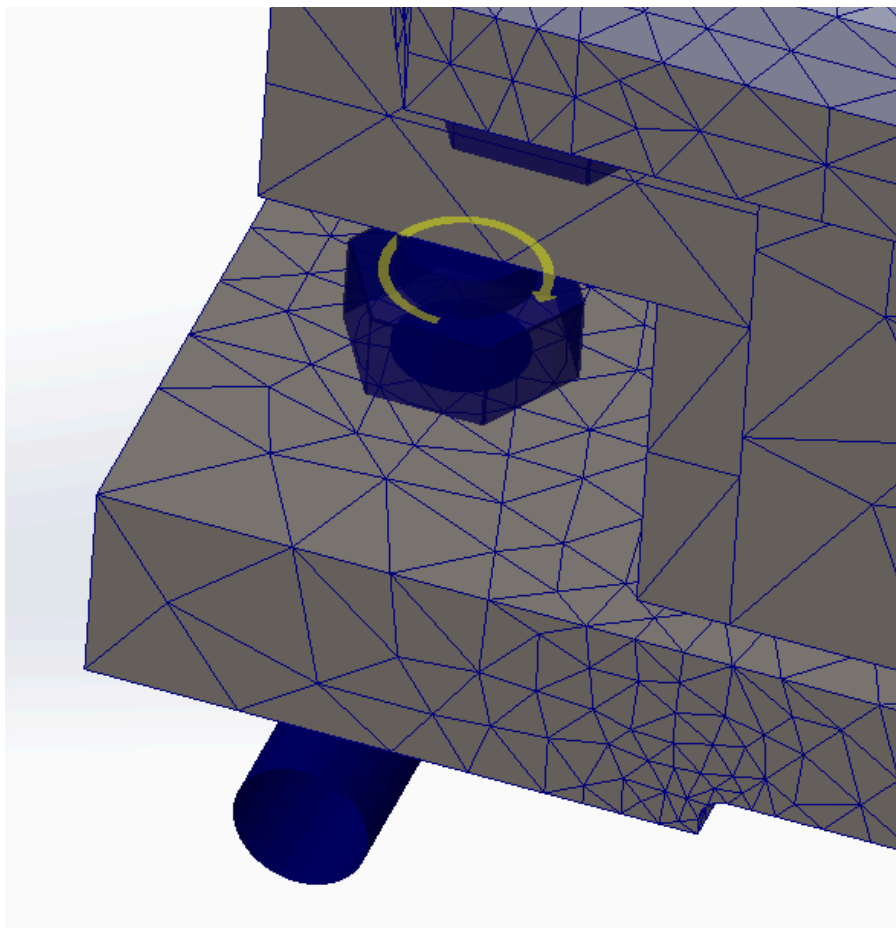
Bonding formulation:

☐ Surface to surface

☒ Node to surface

Підтримується тільки **Curvature-based mesher** і **Standard mesher**. **Blended curvature-based mesher** не підтримує - з'являється попередження.





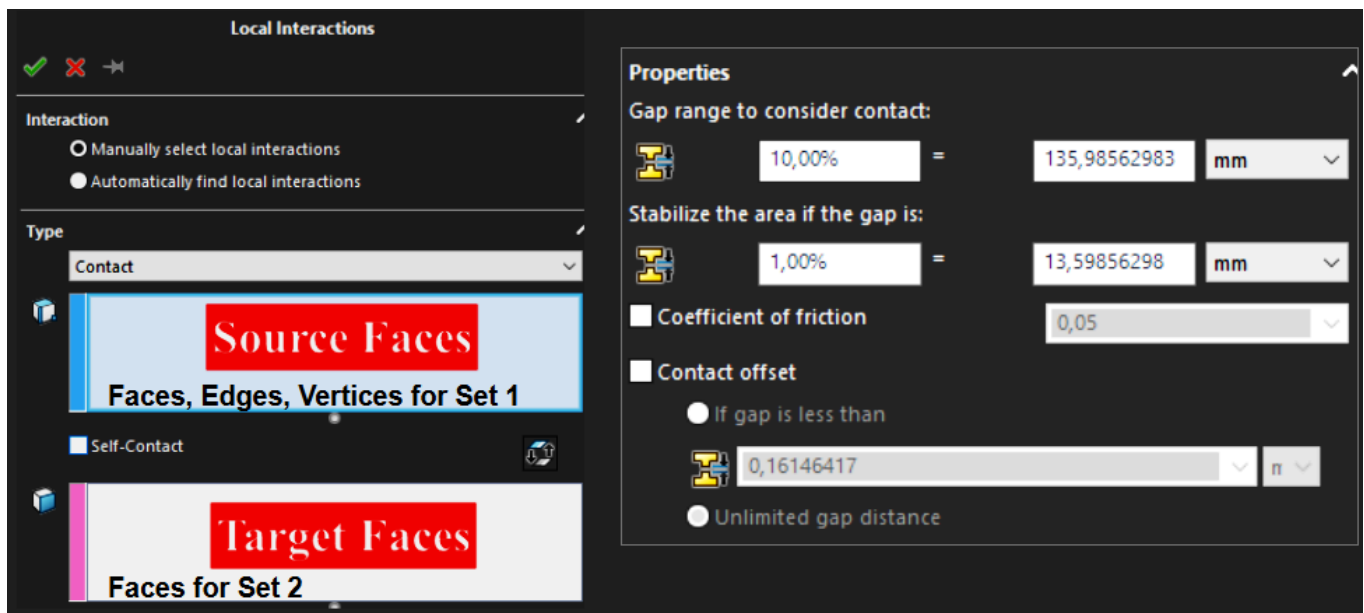
🔥 **Коротке правило застосування даної опції:**

- якщо потрібна **максимальну точність на межі контакту** → вмикати опцію;
- якщо потрібний **швидший розрахунок** або модель велика → краще не вмикати опцію;
- якщо ситуація не визначена, то спочатку можна запустити розрахунок без неї, потім з опцією на грубій сітці і порівняти напруження на межі

У 80–85% типових статичних розрахунків різниця не критична і можна залишати вимкненою для економії часу.

Локальний контакт (Local Interaction)

У локальних контактних взаємодіях SOLIDWORKS важливим є не лише вибір типу контакту, а й правильне призначення наборів **Set 1** і **Set 2**, які в числовій постановці відповідають сторонам **source** і **target** (див. рис.12)



а	б
---	---

Як "ціль" контакту доцільно призначати в **target** більшу, пласкішу та опорну поверхню, а в "джерело" (**source**) - меншу локальну зону контакту. Такий вибір покращує збіжність і стабільність розв'язання.

В інтерфейсі налаштування умов локального контакту (Local Interactions PropertyManager) SOLIDWORKS є функція **Switch source and target entities**, яка автоматично виконує заміну Set 1 / Set 2. В офіційній довідці [5] сказано, що зміна Set 1 / Set 2 може сприяти вирішенню и проблеми збіжності.

🔥 Коротке правило джерела (Source) та цілі (Target):

- У Set 2 / Target краще обирати: **більшу поверхню, пласкішу або геометрично простішу поверхню, опорну або базову сторону контакту;**
- У Set 1 / Source краще обирати: **меншу поверхню, локальну зону дотику;**
- Якщо одна поверхня має **дрібнішу дискретизацію** або локально **меншу середню вузлову площу** - краще обирати її як **Source**; інша, грубіша з точки зору дискретизації або просто більша - краще обирати її як **Target**.

Додаткове пояснення підходів до вибору джерела і цілі локальних контактних умов показані на рис.13

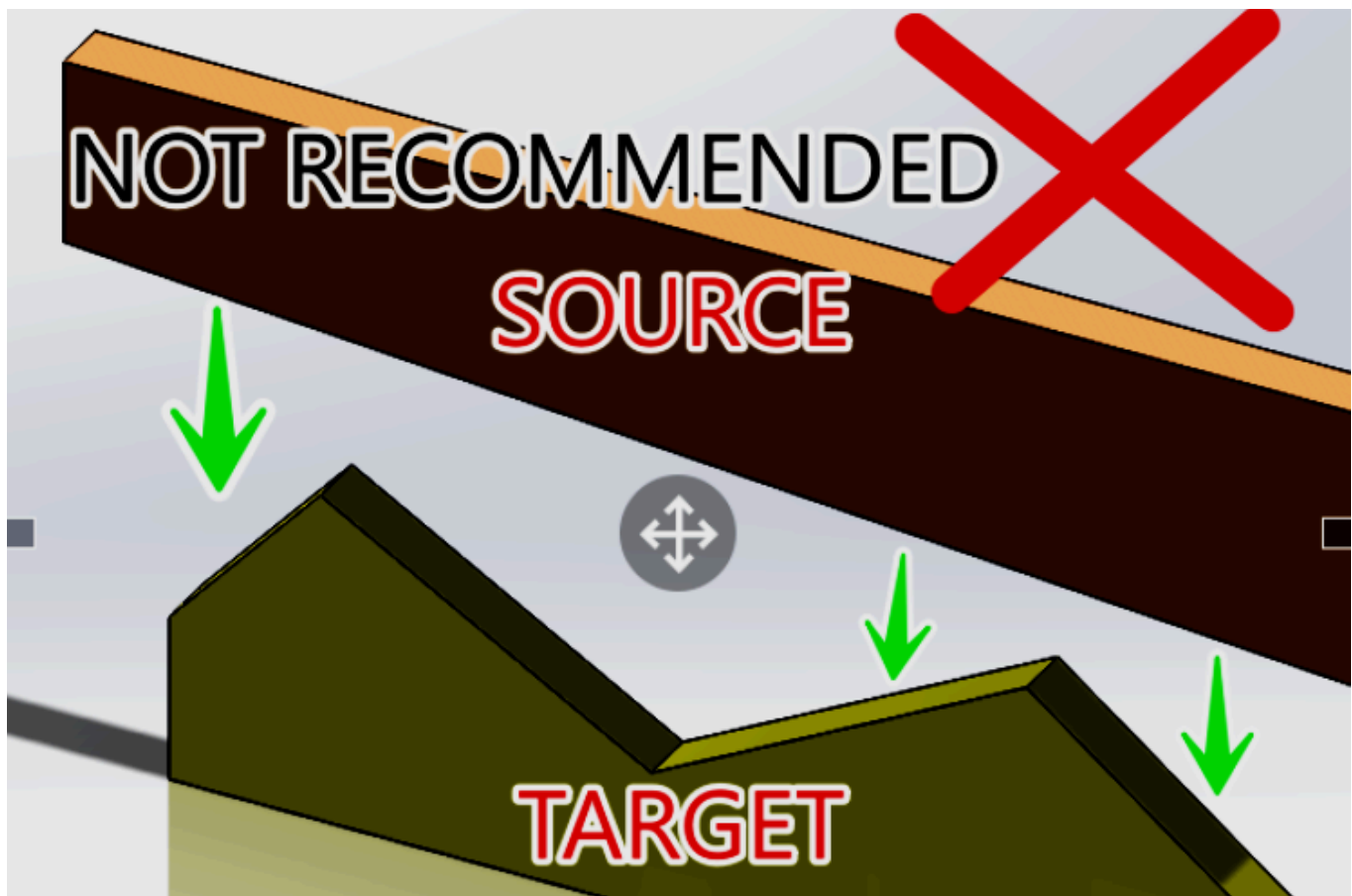


Рис.13. Візуалізація рекомендацій щодо підходу до вибору джерела та цілі локального контакту [6]

Але є постановки задач, де вибір Source / Target практично неважливий, зокрема:

- **Bonded + Enforce common nodes between touching boundaries** - у цьому випадку контакт фактично зводиться до спільної вузлової сумісності на межі деталей чи поверхонь, тому напрямок source/target втрачає сенс.
- для формулювання контакту **surface-to-surface** (нижче це питання буде розкрито) програма взагалі може автоматично обирати кандидатів на source/target.
- Free - контактних взаємодій немає, тому підходи до вибору джерела та цілі не мають сенсу.

В джерелі [6-1] надано наступні додаткові рекомендації щодо вибору джерела і цілі контакту та в цілому симуляції контактних умов взаємодії:

- При моделюванні жорсткого з'єднання між твердими тілами та оболонками рекомендується задавати оболонки як Source, а тверді тіла - як Target.
- У задачах, де суттєвою є концентрація напружень у зоні bonded-з'єднання, обидві частини повинні мати в цій області дрібну скінченно-елементну сітку.
- Точність локальних результатів у зоні bonded-контакту погіршується зі зростанням

різниці жорсткості з'єднаних частин.

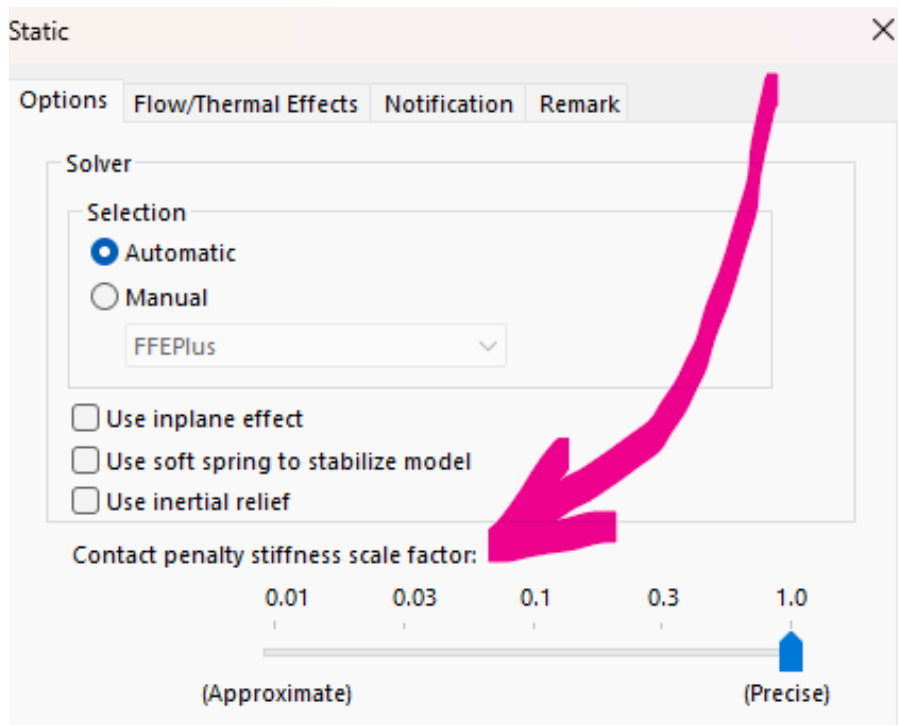
- Для несумісних сіток рекомендується, щоб у наборі Source було більше вузлів, ніж у Target.

Параметри налаштування локального контакту (рис.12,б):

- Параметр **Gap range to consider contact** визначає початковий діапазон зазору, в межах якого поверхні ще розглядаються як потенційно контактуючі.
- **Stabilize the area if the gap is** додає невелику допоміжну жорсткість для стійкості на початковій стадії контакту. Це не відображення фізики реального контакту - це чисельна стабілізація. Вона не повинна помітно впливати на результат, але при некоректно заданому значенні може "маскувати" реальне поведіння конструкції на початку навантаження
- Параметри **Coefficient of friction** (вище це питання детально розглянуто) і **Contact offset** слід задавати лише за наявності інженерного обґрунтування, оскільки вони безпосередньо впливають на нелінійність задачі та інтерпретацію реальної геометрії стику.

Штрафна контактна жорсткість (Contact Penalty Stiffness Scale Factor)

SOLIDWORKS Simulation використовує метод штрафних функцій (**penalty method**) для enforcement контактних умов. "Enforcement контактних умов" - це математичне забезпечення того, що вузли однієї контактної поверхні не проникнуть крізь іншу під час розв'язання системи рівнянь. Це означає, що коли активована **Gap range to consider contact**, то "закриття" чи "вибирання" початкового зазору моделюється не жорсткою кінематичною умовою, а пружиною із дуже великою жорсткістю, що вмикається при пенетрації. Звідси прямий наслідок: **занадто великий штрафний коефіцієнт = погана обумовленість матриці жорсткості; занадто малий = фізично некоректна пенетрація**. Але штрафний коефіцієнт програма вибирає автоматично, а користувач визначає тільки **Scale factor** (див. рис.14). Дана можливість з'явилася починаючи з версії 2023. **Scale factor** - це множник до штрафного коефіцієнту, що розрахований автоматично.



Параметр **"Gap range to consider contact"** безпосередньо визначає, які пари вузлів/граней взагалі потрапляють до контактного детектора. Якщо поставити занадто мало - контакт "не бачить" реальні точки торкання при великих деформаціях. Занадто багато - різко зростає розмір контактної задачі і час розв'язання.

"Stabilize the area if the gap is" додає невелику штучну жорсткість до вузлів, які ще не увійшли в контакт. Це не фізика - це чисельна стабілізація. Вона не повинна помітно впливати на результат, але при некоректно заданому значенні може маскувати реальне поведіння конструкції на початку навантаження.

В 2023 в SOLIDWORKS Simulation з'явився "Contact Penalty Stiffness Scale Factor" - функція, яка дозволяє отримати наближений розв'язок швидше, послаблюючи контактну penalty stiffness у лінійних статичних задачах.

****Розділ 3. Контактні формулювання.**

⚡ **Потрібно чітко розділяти наступне:**

- **ієрархічні рівні контактних умов** - це про те, на якому рівні декомпозиції збірки (всієї збірки одразу, між 2-ма деталями чи між 2-ма окремими геометричними елементами) призначаються умови контакту і про пріоритетність контактних умов між рівнями ієрархії;
- **типи контактів (чи взаємодій після 2021 року) та їхні властивості** - це про відображення фізики реального контакту певними ідеалізаціями в SOLIDWORKS;

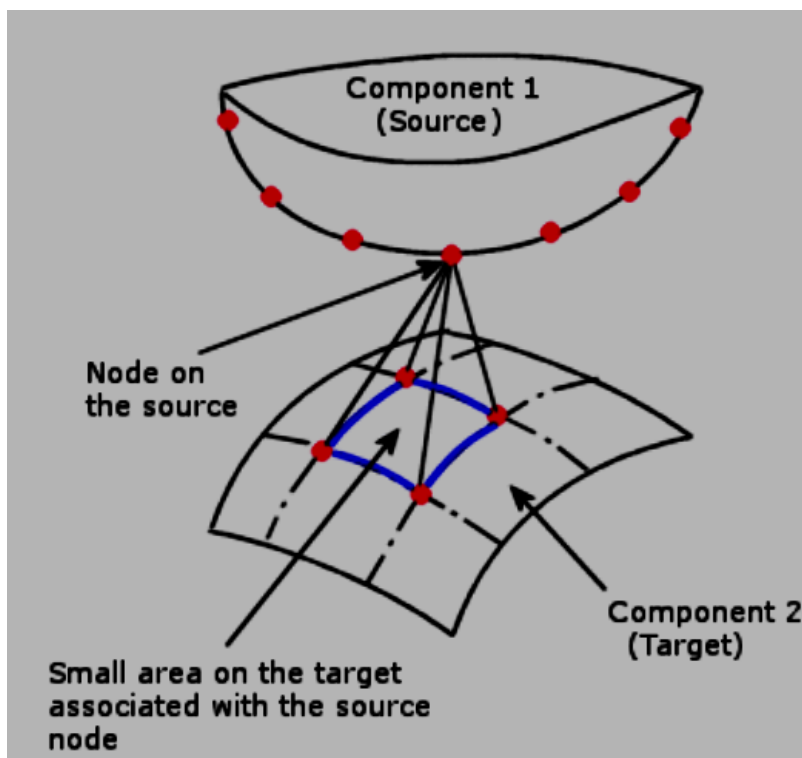
- **контактне формулювання** - це про спосіб, яким реалізується математично контакт

Вузол до поверхні (Node to Surface)

В SOLIDWORKS існують два основних підходи до того, в який спосіб реалізується математично контакт:

- **Node to Surface (N2S)**
- **Surface to Surface (S2S)**

На рис. 15 показана візуалізація **Node to Surface (N2S)**



N2S не вимагає початкового дотику, тобто поверхні можуть бути з початковим зазором. Це критично для задач з великими переміщеннями або попереднім зазором у збірці. Дане формулювання добре працює з незалежною сіткою (яку програмі легше побудувати) - це суттєва перевага при роботі зі складними збірками. Як джерело можна призначити не лише поверхні, а й гострі ребра або окремі вершини деталі - це теж певна перевага даного формулювання. Це формулювання доступне

Поверхня до поверхні (Surface to Surface)

Дане формулювання контактних умов полягає в наступному: обидві поверхні (і джерело, і ціль) розбиваються на **патчі** - скінченні ділянки між вузлами. Контактна умова

накладається не в окремих точках, а як інтеграл тиску по площі кожної пари патчів. Солвер шукає розподіл контактного тиску, який одночасно задовольняє умову непроникнення і рівновагу сил - по всій площі взаємодії

S2S точніший при розподіленому контакті, бо таке формулювання контактів "бачить" контактний тиск як поле, а не як набір точкових сил. Якщо тиск плавно змінюється по поверхні фланця - S2S це відтворює коректно. N2S дає ступінчасте наближення, прив'язане до положення вузлів.

Але S2S нестабільний при точковому контакті, коли контактна зона стягується до лінії або точки, площа патча прямує до нуля.

Короткі рекомендації до вибору контактного формулювання

N2S - коли контакт вироджений (точка, лінія, гостре ребро), сітки несумісні, є початковий зазор, або потрібен тепловий аналіз.

S2S - коли контакт розподілений по площі, сітки сумісні, поверхні від початку торкаються. Загальний випадок за замовчуванням.

В цілому за умов невизначеності варто починати з S2S. Якщо розрахунок не виконується або контактна зона мала - можна перейти на N2S.

Список використаних джерел інформації

1. **Sherak M.** Understanding Contact Hierarchy in SOLIDWORKS Simulation // **Computer Aided Technology (CATI)**. 2018. 08 May. URL: <https://www.cati.com/blog/understanding-contact-hierarchy-in-solidworks-simulation/> 
2. **Terminology Updates for SOLIDWORKS Simulation** [Електронний ресурс] // *SOLIDWORKS Web Help*. 2021. URL: https://help.solidworks.com/2021/English/WhatsNew/c_wn2021_simulation_terminology_updates.htm?id=89ca691ba92e4c20b4a6c0f862e28d7f#Pg0 
3. **Sherak M.** Understanding Contact Hierarchy in SOLIDWORKS Simulation [Електронний ресурс] / M. Sherak // *Computer Aided Technology*. 2018. May 08. URL: <https://www.cati.com/blog/understanding-contact-hierarchy-in-solidworks-simulation/>  
4. **SOLIDWORKS.** Bonded Contact [Електронний ресурс] // *SOLIDWORKS Help 2020*. – Режим доступу: https://help.solidworks.com/2020/english/SolidWorks/cworks/c_Bonded_Contact.htm    
5. **Local Interactions PropertyManager – 2026** // **SOLIDWORKS Web Help** [Електронний ресурс]. – Режим доступу: help.solidworks.com. 

6. **SOLIDWORKS Simulation Step-Up Series: Contact Modeling ... // YouTube** [Электронный ресурс]. –

Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=JoreYL2l4No> ↩ ↪